DIMORFISMO SEXUAL CEREBRAL • AGUJEROS NEGROS CUANTICOS

INVESTIGACION y CIENCIA

JULIO 2005
6,00 EUROS

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

RETINAS ARTIFICIALES

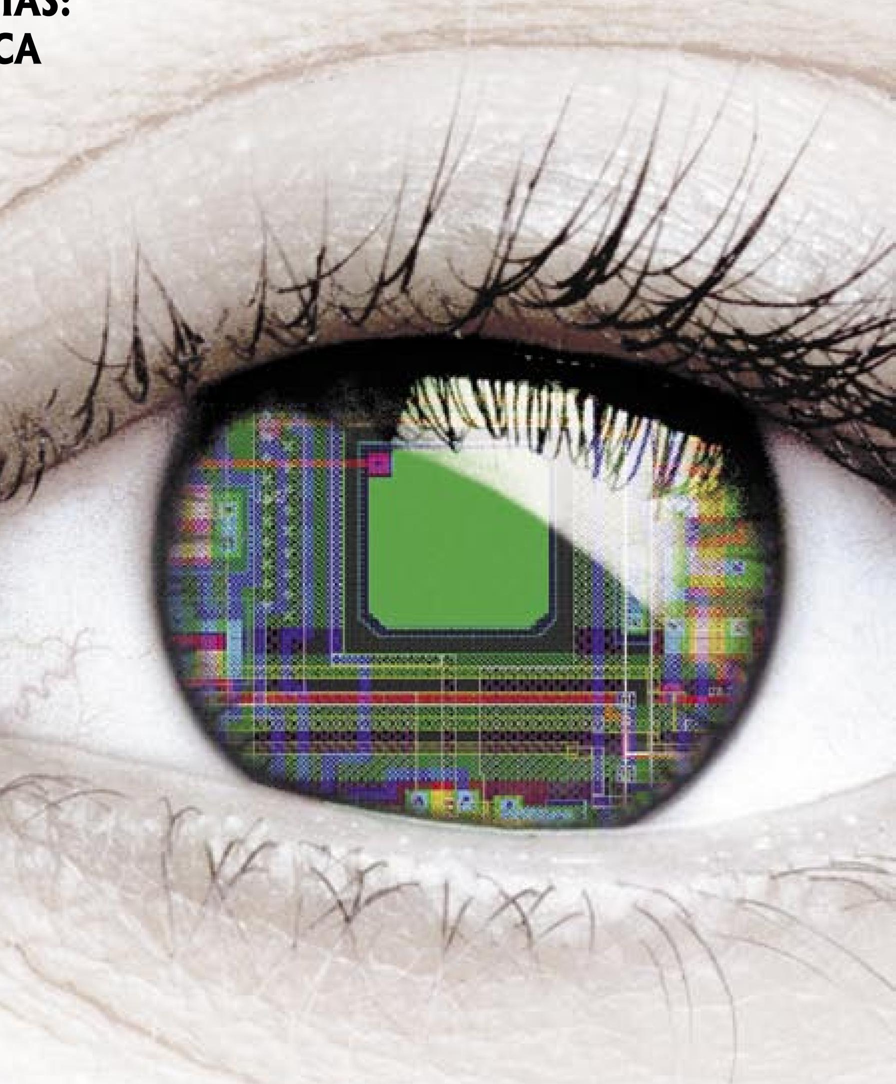
PROLIFERACION DE LAS CLAMIDIAS: UN PROBLEMA DE SALUD PUBLICA

COMPUESTOS HALOGENADOS EN LA NATURALEZA

COLISIONES DE ASTEROIDES EN EL SISTEMA SOLAR

CICLO CELULAR

EL RAYO







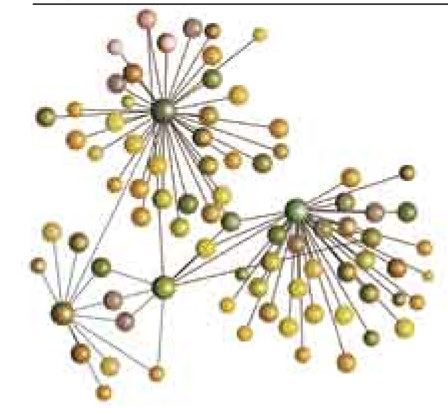
Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

Julio de 2005

Número 346



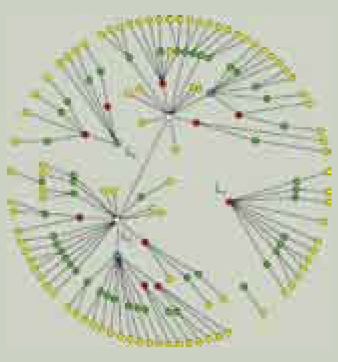








LONG









DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN John Sargent

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

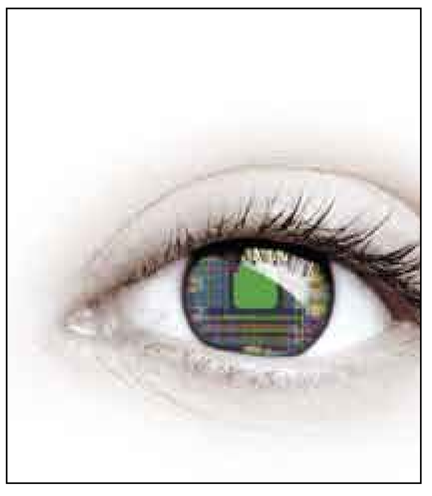
Madrid:
Manuel Martín Martín
Teléfono 670 236 715
e-mail: publicidad-ic@hotmail.com

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Luis Bou: *Dimorfismo sexual cerebral*; Ramón Pascual: *Agujeros negros cuánticos*; Manuel Puigcerver: *El rayo*; M.ª José Báguena: *¿Se puede detener a las clamidias?*; M.ª Rosa Zapatero Osorio: *¿Qué calentó los asteroides?*; Juan Manuel González Mañas: *Minería de textos científicos*; Stephan Pohl: *Halogenuros orgánicos*; J. Vilardell: *Hace...*, Apuntes e *Ideas aplicadas*; Ramón Muñoz Tapia: *Taller y laboratorio*



Portada: Stone (*ojo*), Kareem Zaghloul (*retina*), Jen Christiansen (*fotocomposición*)

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

NUEVO ELEMENTO. «Durante algunos días a principios de este año hubo algo nuevo bajo la luz del sol, aunque no en demasiada cantidad. Químicos de la Universidad de California consiguieron crear 17 átomos del elemento 101. La sustancia, bautizada mendelevio (símbolo Mv; *ahora Md*) en honor del padre de la tabla periódica, se formó bombardeando el elemento 99 con partículas alfa procedentes de un ciclotrón. El isótopo así obtenido, cuyo peso atómico es 256, se desintegra por fisión espontánea con un semiperíodo comprendido entre treinta minutos y varias horas.»

CARBÓN. «El análisis del carbón a partir de sus constituyentes elementales nada nos dice acerca de él como sustancia. Para ello, necesitamos conocer su estructura química, es decir, de qué modo se enlazan sus átomos para formar moléculas. El esfuerzo vale la pena, pues cuanto más se sepa sobre cómo se conforma, con más precisión podrá descomponerse para obtener sustancias químicas de interés. Ya se ha perfeccionado un proceso que permite descomponerlo en más de 200 compuestos, algunos completamente nuevos o en cantidades nunca conseguidas. Es este hecho el que llevó a químicos y conservacionistas a concluir que lo más despilfarrador que puede hacerse con el carbón es quemarlo.»

...cien años

EL CANAL DE PANAMÁ. «El presidente Roosevelt ha comparado los desertores que han vuelto a casa desde Panamá, con la boca llena de críticas y quejas, a los pocos soldados medrosos y gárrulos que se echan atrás en el fragor de la batalla. Nadie supone que el istmo de Panamá sea precisamente ahora un balneario, un sanatorio ni un lugar de vacaciones; al propio tiempo, sí comienza a parecer que hubiésemos acometido los trabajos de construcción sin abordar los preparativos especiales para la recepción, alojamiento y alimentación de la fuerza laboral, que las muy penosas condiciones en el istmo hacen necesarias. Sea como sea, que el ejército se encargue del trabajo. Sería tentar al desastre encargar de los cuidados y la alimentación a los responsables de las casas de huéspedes.»

DIAMANTES ARTIFICIALES. «Ya en posesión del horno eléctrico, el profesor Henri Moissan, eminente químico francés, intentó reproducir el proceso que se supone sigue la naturaleza para formar diamantes. La operación esencial consiste en disolver el carbono en hierro mantenido en fusión a 2760 ºC. El siguiente paso, enfriar bruscamente la masa para que forme una costra sólida. Luego, cuando el interior se enfría, trata de dilatarse; pero está aprisionado por la capa externa. Por efecto de la enorme presión resultante, el carbono se separa del hierro en forma de finos granos de diamantes negros y transparentes.»

HOMBRE Y CABALLO. «Nuestra fotografía representa un grupo bellamente compuesto por el esqueleto de un caballo y el esqueleto de un hombre, recientemente expuestos en el Museo Americano de Historia Natural. La imagen muestra que los huesos de un hombre y un caballo son rigurosamente comparables, si bien el primero conserva más de las características primitivas comunes a todos los mamíferos, mostrando el caballo mayor especialización en la estructura de sus extremidades y su dentadura trituradora.»



Esqueletos de hombre y caballo comparados, 1905.

...ciento cincuenta años

ANCLAR LA ARENA. «Procedentes de Holanda, se han recibido en la Oficina de Patentes las semillas de junco marino (*Arundo arenaria*) y de hierba europea de las dunas (*Elymus arenarius*), que hace tiempo se emplean en aquel país para domeñar los cúmulos de arena en las costas marinas. Se han importado esas semillas para experimentarlas a lo largo de toda la costa atlántica, desde Maine hasta Florida. Los nutrientes que aportan esas hierbas no bastan para que valga la pena cultivarlas, pero la combinación de ambas resulta de gran utilidad, pues traban las arenas sueltas de la costa marina, alzando con ello una barrera perdurable frente a la invasión del océano sobre las costas. De hecho, Holanda debe su propia existencia, en medida considerable, a la acción preservadora de las mismas.»

MADERA PARA LA ARMADA. «¿Cuántos árboles forman un buque? Se necesitan 2000 árboles adultos, o la cosecha madura de 18 hectáreas de bosque, para suministrar el maderaje de un solo buque de 74 cañones.»

APUNTES

TELECOMUNICACIONES

Fibra en casa

No está siendo fácil cubrir también con fibra óptica, en vez de con cobre, esa "última milla" que separa los hogares de las líneas ópticas que forman las redes de telecomunicaciones. La capacidad de transmisión de la fibra es muchísimo mayor que la del cobre: en el laboratorio ya canaliza diez terabits (diez billones de bit) por segundo, y podría llegar hasta los cien terabits, mientras que una conexión de ADSL que utiliza el hilo de cobre telefónico sólo alcanza unos millones de bits por segundo. El inconveniente hasta ahora había sido el coste. Sin embargo, el precio de cablear con fibra una casa en las nuevas urbanizaciones ha disminuido hasta igualarse al de la instalación del hilo de cobre. Verizon Communications planea ofrecer acceso a Internet por fibra en Estados Unidos al menos a tres millones de hogares para finales de 2005. Divide la señal de una línea de fibra de 620 megabits por segundo en 32 líneas de abonados, cada una de 19,38 megabits, si bien se puede elegir la recepción de un sexto de la señal, unos cien megabits por segundo. En Japón, el servicio B Flet de NTT ofrece a los domicilios conexiones por fibra de hasta 100 megabits. Sólo esta última prestación supera la de las mejores conexiones de ADSL, que descargan 25 megabits en hogares que se encuentren a menos de kilómetro y medio de un nodo de la red, e incluso 100, pero sólo cuando esa distancia no pasa de los 150 metros (en Japón se ofrecen 50 megabits por unos 30 euros al mes, con la advertencia de que esa velocidad máxima se degrada con la distancia al nodo). Los 25 megabits dan de sí para un solo canal de televisión de alta definición, varios canales ordinarios y servicios de datos y telefonía, con compresión en el caso del ADSL y sin ella en las conexiones de fibra (la televisión va por la misma fibra, pero a otra frecuencia). Sin embargo, más tarde o más temprano, la fibra desplazará al cobre también en las viviendas. Los cien megabits de las mejores conexiones ópticas domésticas sólo realizan una millonésima de la capacidad teórica de la fibra.

—*Lamont Wood*



En España, en 2004, sólo un 0,8 por ciento de los accesos de banda ancha a Internet se realizaba mediante conexiones de fibra óptica. Pero en algunas partes del mundo éstas empiezan a llegar incluso a los hogares.

EVOLUCION

Especiación en el desierto

Cuando unos organismos quedan apartados de su población original, su evolución divergirá de la que ésta pueda seguir. Esta es una de las premisas de la biogeografía. No sólo la geología crea ese tipo de aislamientos. También el clima puede ser una barrera eficaz. Lo ha demostrado el descubrimiento de dos especies de anfibios, *Nigerpeton ricqlesi* y *Saharstega moradiensis*, hasta ahora desconocida. Vivieron hace unos 250 millones de años en el norte de Níger. Guardan alguna semejanza con las salamandras, aunque fueron mucho mayores, como un cocodrilo. Pero han sorprendido no por eso, sino por sus hondas diferencias con respecto a otros seres de aquellos tiempos. La unión de casi todas las masas terrestres en el supercontinente Pangea permitió a los tetrápodos difundirse por todas partes. El clima de ese período cambió: de unas condiciones en que el hielo llegaba hasta Sudáfrica se pasó a otras mucho más cálidas. El centro de Pangea, donde hasta ahora se había excavado mucho menos, se volvió sequísimo. Grupos de tetrápodos quedaron aislados en zonas a las que ahora rodeaban desiertos. Esa puede ser la razón del gran primitivismo de las dos especies recién descubiertas. Las especies más afines vivieron en Norteamérica y Europa entre 40 y 90 millones antes. *Nigerpeton* y *Saharastega* serían, pues, relictos de una radiación de la que se creía que había desaparecido mucho antes. El mismo aislamiento explicaría además la ausencia en los sitios de los hallazgos de los dicinodontes, reptiles con rasgos de mamífero que dominan los yacimientos fosilíferos de la época.

—*Kate Wong*



El Sahara tenía enterrados fósiles de un anfibio gigante, el *Saharastega* (*recuadro*), que vivió en los oasis de un desierto parecido hace 250 millones de años.

MARK E. GIBSON *Corbis* (*arriba*); CHRISTIAN A. SIDOR *New York College of Osteopathic Medicine* (*abajo*)

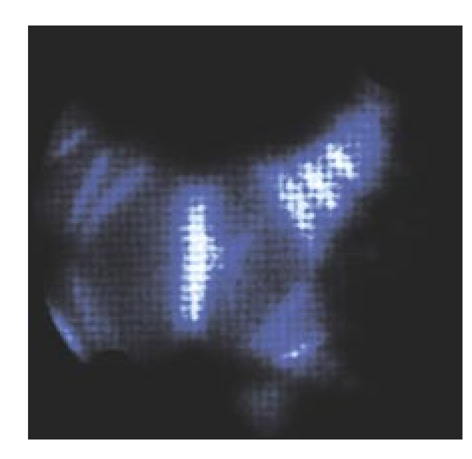
CIENCIA NUCLEAR

Una fusión realmente fría

Normalmente, la fusión nuclear requiere un calor de muchos millones de grados. Existe, sin embargo, un dispositivo del tamaño de un balde que funde núcleos a temperaturas inferiores a la de congelación del agua. El elemento central de la máquina en cuestión es un cristal de tantalato de litio, que genera un campo eléctrico cuando se calienta. Una aguja de tungsteno, que se conecta a la sustancia piroeléctrica enfriada por medio de nitrógeno líquido, enfoca ese campo de tal modo que cuando el cristal se calienta hasta unos –3 grados, los iones de deuterio que rodean a la aguja salen impulsados a velocidad suficiente para que se fusionen en un blanco cargado también con deuterio. Los generadores de energía por fusión piroeléctrica son una quimera: un solo ciclo de la máquina produce alrededor de 10 nanojoule, energía que apenas basta para calentar unas pocas millonésimas de grado el agua contenida en un dedal. Aun así, el proceso podría llevarnos hasta generadores de neutrones de tamaño de bolsillo, mucho más simples que los actuales, que valdrían como propulsores en astronaves de miniatura o para terapias médicas de vanguardia.



—Charles Q. Choi



Luz de fusión. Un blanco de plástico de 2,5 centímetros de ancho cargado con deuterio brilla en la oscuridad cuando sobre él inciden iones de deuterio.

ETICA CIENTIFICA

Insospechada magnitud de las irregularidades científicas

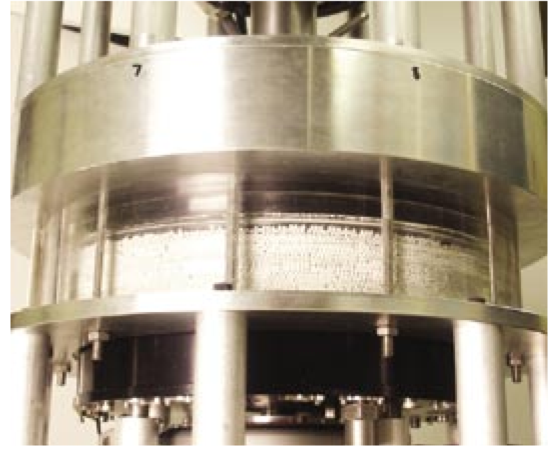
En 2000, un organismo del gobierno estadounidense consideraba actos de mala conducta científica “amañar, inventar o plagiar”. Las investigaciones, bastante limitadas, que se han realizado con la intención de averiguar el alcance de estos fraudes arrojan una incidencia del uno o dos por ciento. En 2002, instancias de la administración propusieron, también en Estados Unidos, un estudio más amplio que tuviese en cuenta otros tipos de prácticas reprobables, pero las instituciones colegiales de las áreas biológicas y médicas se negaron a llevarlo a cabo. Ahora, en junio, tres investigadores han publicado en *Nature* los resultados de unas encuestas anónimas remitidas a 3600 científicos que recibieron por primera vez fondos para un proyecto de investigación entre 1999 y 2001 (edad media, 44 años) y a 4160 científicos que siguieron alguna formación posdoctoral en 2000 y 2001 (edad media, 35); los casi diez mil eran perceptores de fondos de los Institutos Nacionales de la Salud, el conglomerado de centros de investigación biomédica del gobierno de Estados Unidos. Aproximadamente la mitad de la muestra aportó respuestas útiles. Sólo un 0,3 por ciento admitió haber falsificado o plagiado, pero el 6 por ciento confesó que no había presentado datos que contradecían sus investigaciones anteriores, el 15,5 que había cambiado el diseño o los resultados de un experimento por presiones de un patrocinador y el 12,5 que había hecho la vista gorda al uso por otros de datos defectuosos. En total, la tercera parte —38 por ciento del primer grupo, 25 del segundo— admitía haber cometido al menos una de diez irregularidades que, de ser descubiertas, seguramente le supondrían una sanción al responsable; pero además un 13,5 por ciento dice haber recurrido a diseños experimentales deficientes y un 15,3 que ha suprimido datos por una sensación “visceral”. Los autores del trabajo manifiestan cuánto les han impresionado los resultados de la encuesta. El director del Centro de Bioética de la Universidad de Pennsylvania, en cambio, declara a *Nature* que no deben hacer pensar que la ciencia esta “corroída”. Sin embargo, ¿cuál es la “robustez”, como dicen los estadísticos, de la validez de un resultado científico ante las conductas dudosas que puedan intervenir en su obtención? ¿Cuántos resultados publicados y admitidos no son de verdad fiables?

FISICA

Congelación granular

Cuando la materia, en la mayoría de sus formas, se calienta, se vuelve más fluida. Pero las masas granulosas parecen una excepción. Bob Behringer y Karen Daniels, de la Universidad Duke, llenaron de canicas de plástico una tolva cilíndrica y cerrada. En reposo, parecían un sólido cristalino, como el hielo. Cuando se las cizallaba girando la parte superior del recipiente, la energía que se les cedía así “fundía” el cristal hasta un estado más amorfo y fluido, como era de esperar. Pero al inyectar más energía mediante vibraciones de la tolva, ocurría algo extraño: se “recongelaban”. Un golpeteo intenso torna las canicas momentáneamente ingrávidas, lo que les permite apretarse más unas a otras, según la hipótesis con que ambos investigadores quieren explicar el fenómeno. El resultado contradice la razón por la que se usan alimentadores vibratorios en el procesamiento de polvos y granulados, a saber, que la agitación favorece la fluidez de los granos.

—J. R. Minkel



Las canicas sometidas a vibración muestran un comportamiento a primera vista paradójico.

BRIAN NARANJO UCLA (*arriba*); CORTESIA DE BOB BEHRINGER *Universidad de Duke* (*abajo*)



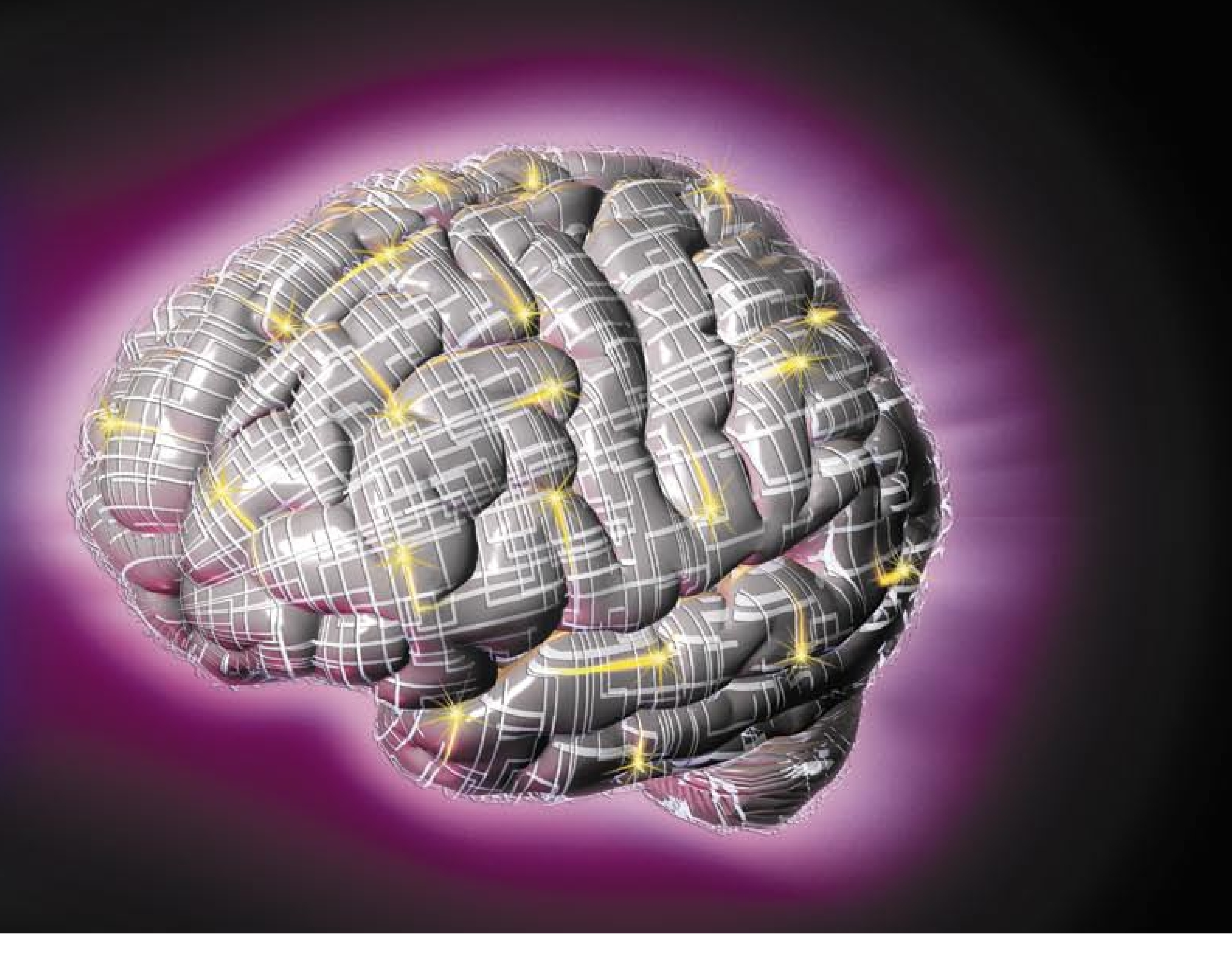
DIMORFISMO SEXUAL

El cerebro del varón difiere del cerebro de la mujer en organización y actividad. La investigación de las variaciones observadas podría llevar a un tratamiento de patologías mentales específico para cada sexo

En un día gris, a mediados de enero, Lawrence Summers, rector de la Universidad de Harvard, dejó caer que entre las causas de la escasez de mujeres dedicadas a las ciencias podrían contarse unas diferencias innatas en la constitución de los cerebros masculino y femenino. Esas declaraciones atizaron el fuego de un debate que lleva humeando desde hace un siglo, desde que algunos medidores del cerebro humano se valieron de uno de los resultados que habían obtenido, que el tamaño medio del cerebro de las mujeres es menor que el de los hombres, para ratificar la superioridad intelectual de éstos.

Nadie, hasta la fecha, ha descubierto prueba alguna de que la mujer, por sus peculiaridades anatómicas, sea incapaz de alcanzar la excelencia en matemáticas, física

SLIM FILMS



CEREBRAL

LARRY CAHILL

o ingeniería (*véase el recuadro* "La polémica del rector de Harvard"). Se ha demostrado que el cerebro de un sexo se parece mucho en multitud de aspectos al del otro. No obstante, a lo largo de los diez últimos años, las investigaciones realizadas sobre una variedad de cuestiones, que van desde el procesamiento del lenguaje, la capacidad de orientarse en un recorrido o el registro de recuerdos emotivos, han sacado a la luz un asombroso abanico de variantes estructurales, químicas y funcionales entre el cerebro del varón y el de la mujer.

Estas desigualdades no se reducen a meras idiosincrasias que expliquen por qué les gustan más a los hombres que a las mujeres cierto tipo de programas de televisión: nos llevan a pensar que quizá haya que desarrollar tratamientos diferenciados según el sexo para diversas enfermedades, entre ellas las depresiones, las drogodependencias, la esquizofrenia o el síndrome de estrés postraumático. Tales diferencias entrañan, además, que en las investigaciones futuras relativas a la estructura y función del cerebro se deba tener en cuenta el sexo de los participantes al analizar los datos, pues de lo contrario cabe el riesgo de obtener resultados engañosos.

Esculpir el cerebro

Hasta no hace mucho, se creía que las diferencias cerebrales entre los individuos de uno y otro sexo se limitaban a las regiones responsables de las conductas de apareamiento. En un artículo publicado en 1966 por SCIENTIFIC AMERICAN, Seymour Levine, de la Univer-

sidad de Stanford, exponía el modo en que las hormonas sexuales contribuían a dirigir los divergentes comportamientos reproductivos en la rata (los machos empeñados en montar a las hembras, éstas que arquean los lomos y alzan las ancas para atraer pretendientes).

Levine, en su artículo, mencionaba tan sólo una región del cerebro: el hipotálamo, pequeña estructura situada en la base del cerebro, que participa en la regulación de la producción de hormonas y en el control de actividades fundamentales, como las alimentarias y las sexuales. Toda una generación de neurocientíficos maduró convencida de que la expresión "diferenciación cerebral sexual" se refería sólo a las conductas de apareamiento, a las hormonas sexuales y al hipotálamo.

Tal concepción ha quedado arrinconada ante una marea de hallazgos que resaltan la influencia del sexo en muchas facetas de la cognición y de la conducta; entre ellas, la memoria, las emociones, la visión, la audición, el procesamiento de rostros y la respuesta del cerebro a las hormonas del estrés. Tales progresos se han visto acelerados en los últimos años por la aplicación de técnicas muy refinadas y no invasivas de obtención de imágenes, basadas en la tomografía por emisión de positrones o la resonancia magnética funcional, que permiten observar el interior del cerebro de sujetos vivos.

Dichos experimentos de obtención de imágenes han descubierto que las variaciones anatómicas se dan en multitud de regiones repartidas por todo el cerebro. Por ejemplo, Jill M. Goldstein y sus compañeros de la facultad de medicina de Harvard se valieron de imágenes obtenidas por resonancia magnética para medir las dimensiones de numerosas regiones corticales y subcorticales. Hallaron así, entre muchas otras cosas, que ciertas porciones de la corteza frontal, donde se asienta una buena parte de las funciones superiores de la cognición, ocupan mayor volumen en las mujeres que en los hombres; algo similar ocurre en zonas de la corteza límbica, que participa en las reacciones emotivas.

En los hombres, en cambio, ciertas porciones de la corteza parietal, que interviene en la percepción del espacio, tienen mayor tamaño que en las mujeres, y otro tanto ocurre en la amígdala, una estructura en forma de almendra que responde a toda información que suscite emociones; es decir, a lo que provoque descargas de adrenalina y haga latir al corazón con fuerza. Estas diferencias de tamaño, lo mismo que otras mencionadas en el artículo, son de carácter relativo: se refieren a la razón del volumen de la estructura con respecto al volumen total del cerebro.

Se considera, en general, que las diferencias de tamaño de las estructuras cerebrales reflejan su importancia relativa para el animal. Por ejemplo, los primates se fundan más en la vista que en el olfato; en las ratas ocurre lo contrario. En consecuencia, el cerebro de primate está dotado de regiones proporcionalmente mayores dedicadas a la visión; las ratas, en cambio, asignan, en proporción, más espacio a la olfacción. Por ello, la existencia de amplias disparidades anatómicas entre hombres y mujeres induce a pensar que el sexo del individuo sí influye en la forma en que funciona su cerebro.

Otras investigaciones están descubriendo diferencias celulares de origen sexual. Así, Sandra Witelson y sus colegas de la Universidad McMaster han observado que la densidad de neuronas en ciertas regiones, asociadas a la comprensión y procesamiento del lenguaje, del lóbulo temporal de la corteza es mayor en la mujer. Tras efectuar recuentos de neuronas en muestras *postmortem*, descubrieron que de las seis capas de que consta la corteza, dos de ellas exhibían mayor número de neuronas por unidad de volumen en la mujer que en el hombre. Posteriormente informaron de hallazgos similares en el lóbulo frontal. Contando con tal información, se puede explorar ahora si tales diferencias en el número de neuronas del varón y la mujer guardan correlación con diferencias en las capacidades cognitivas: examinando, por ejemplo, si la mayor densidad de neuronas en la corteza auditiva femenina tiene que ver con las puntuaciones, por lo común más elevadas, que alcanzan las mujeres en las pruebas de fluidez verbal.

Tal diversidad anatómica podría deberse, en buena medida, a la actividad de las hormonas sexuales que bañan al cerebro fetal. Estos esteroides contribuyen a dirigir la organización y conexionado del cerebro durante el desarrollo, e influyen en la estructura y densidad neuronal de diversas regiones. Es de señalar que las regiones cerebrales donde Goldstein halló diferencias entre hombres y mujeres contienen, en animales, mayor número de receptores de hormonas sexuales durante el desarrollo. Esta correlación entre el tamaño de la región cerebral en los adultos y la acción de esteroides sexuales en el útero sugiere que algunas, al menos, de las diferencias observables en las funciones cognitivas de uno y otro sexo no son fruto de influencias culturales o de cambios hormonales asociados con la pubertad, sino que están presentes desde el nacimiento.

Resumen/Cerebros

- Los neurocientíficos están descubriendo diferencias anatómicas, químicas y funcionales entre el cerebro del varón y el de la mujer.
- Estas variaciones se reparten por todo el órgano, en regiones que participan en el lenguaje, la memoria, las emociones, la visión, la audición y en la forma de guiarse para ir de un lugar a otro.
- Se trabaja para determinar las relaciones entre estas disparidades de origen sexual y las diferencias de cognición y conducta de hombres y mujeres. Los descubrimientos podrían señalar el camino hacia terapias específicas en enfermedades neurológicas como la esquizofrenia, la depresión, la drogodependencia y el estrés postraumático.

Inclinaciones innatas

Varios estudios sobre la conducta aportan nuevos indicios de que ciertas diferencias sexuales del cerebro surgen antes del primer lloro. A lo largo de los años, han sido muchos los investigadores que han puesto de relieve que los niños, desde pequeños, toman sendas diferentes de las niñas al elegir juguetes. Los

niños suelen orientarse hacia pelotas o coches de juguete, mientras que las niñas optan por las muñecas. Pero nadie podía asegurar que tales preferencias venían dictadas por la influencia cultural o por la biología cerebral innata.

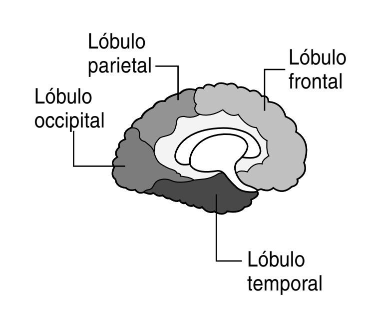
Para abordar la cuestión, Melissa Hines, de la Universidad Municipal de Londres, y Gerianne M. Alexander, de la Universidad A&M de Texas, recurrieron a los monos. Presentaron una selección de juguetes a un grupo de simios (una especie típica de Africa del Sur) en la que figuraban muñecas de trapo, coches y objetos neutros, por ejemplo libros ilustrados. Observaron que los machos dedicaban más tiempo que las hembras a los juguetes "masculinos", y que éstas dedicaban más tiempo a interactuar con los juguetes de ordinario preferidos por las niñas. Ambos sexos dedicaron, sin embargo, idéntico tiempo a curiosear los libros ilustrados y otros juguetes sin connotaciones de género.

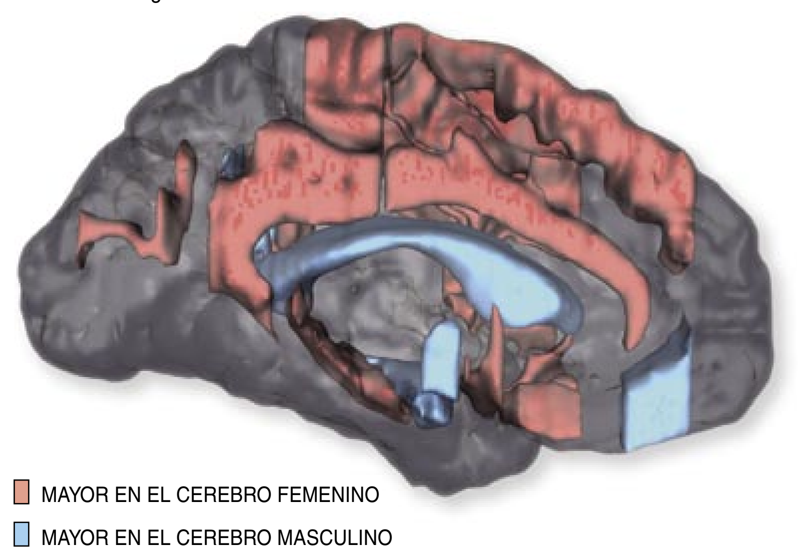
Como es improbable que las presiones sociales de la cultura humana hayan condicionado a los monos vervet, los resultados dan a entender que las preferencias infantiles hacia unos u otros juguetes se deben, al menos en parte, a diferencias biológicas innatas. Esta divergencia, y de hecho, todas las diferencias anatómicas que presenta el cerebro de uno y otro sexo, surgieron, presumiblemente, en virtud de presiones selectivas durante la evolución. En el caso del experimento de los juguetes, los machos, tanto humanos como primates, prefieren los juguetes a los que se pueda ir impartiendo movimiento de manera continua y vengan bien para juegos donde haya peleas y agitación. Estas cualidades, parece razonable conjeturarlo, podrían tener relación con conductas útiles para la caza o para conseguir compañera. Análogamente, cabría presumir que las hembras seleccionan juguetes que les permiten afinar las destrezas que les serán precisas para la crianza de sus crías.

Simon Baron-Cohen y sus asociados de la Universidad de Cambridge adoptaron una metodología diferente, aunque no menos original, para investigar la influencia relativa de la naturaleza y de la crianza en lo que toca a las diferencias entre los sexos.

DIFERENCIAS MENSURABLES EN EL CEREBRO

Existen diferencias anatómicas en cada lóbulo cerebral, según el sexo. Cuando el grupo encabezado por Jill M. Goldstein, de la facultad de medicina de Harvard, midió el volumen relativo de determinadas áreas de la corteza cerebral con respecto al volumen total del cerebro, observó que muchas regiones eran proporcionalmente mayores en las mujeres que en los hombres, mientras que otras eran mayores en éstos (*abajo*). Se ignora si la disparidad anatómica se traduce en diferencias en las facultades cognitivas.





FUENTE: JILL M. GOLDSTEIN *Escuela de Medicina de Harvard y Centro Connors de Salud de la Mujer y Biología de Género del Hospital Grigham para la Mujer;* BASADO EN JILL M. GOLDSTEIN ET AL. EN *CEREBRAL CORTEX*, VOL. 11, N.º 6, PAGS. 490-497; JUNIO DE 2001

Muchos investigadores han descrito disparidades en lo mucho o poco que se "centran en los demás" niños y niñas de muy corta edad. Por ejemplo, Baron-Cohen y su discípula Svetlana Lutchmaya descubrieron que las niñas de un año pasan mucho más tiempo mirando a sus madres que los niños de esa misma edad. Y cuando se les ofrecía mirar varias películas, unas de rostros, otras de coches, se fijaban más tiempo en las primeras; los niños, en cambio, se inclinaban hacia las segundas.

Estas preferencias podrían atribuirse a la forma en que los adultos actúan o juegan con niños y niñas. Para eliminar tal posibilidad, Baron-Cohen y sus alumnos dieron un paso más. Llevaron su cámara de vídeo a una sala de una maternidad para examinar las preferencias de recién nacidos de sólo un día de edad. Les mostraron el rostro amigable de una estudiante de doctorado —la primera firmante del artículo en que se expuso este experimento— o un móvil que recordaba en color y tamaño al rostro de la investigadora y donde se habían adherido rasgos faciales desordenados.

Para evitar posibles sesgos, los experimentadores ignoraban durante el ensayo el sexo de los bebés. En las cintas que se grabaron vieron que las niñas dedicaban más tiempo a mirar el rostro de la investigadora, y los niños, el objeto mecánico. Esta diferencia en interés social era manifiesta ya en el primer día de vida. Al parecer, pues, salimos del seno materno con diferencias cognitivas según el sexo.

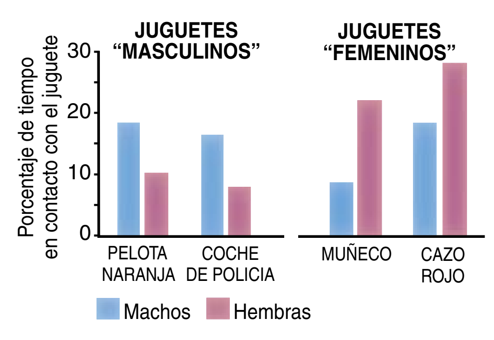
Sometidos a estrés

En muchos casos, las diferencias entre uno y otro sexo por lo que se refiere a los procesos químicos del cerebro y en su construcción influyen en la forma en que hombres y mujeres responden al ambiente, en cómo reaccionan ante aconteci-

¿PREFERENCIAS INNATAS?

Los monos vervet observados por Gerianne M. Alexander, de la Universidad A&M de Texas, y por Melissa Hien, de la Universidad Municipal de Londres, exhibieron preferencias por los juguetes concordantes con los estereotipos de niños y niñas: los machos (*foto superior*) jugaron más tiempo con coches, por ejemplo, mientras que las hembras (*foto inferior*) se entretuvieron con las muñecas (*gráficos de barras*). Tales patrones implican que las elecciones que efectúan los niños pueden emanar en parte de su organización nerviosa, y no necesaria y estrictamente de su educación.







mientos estresantes y en cómo los recuerdan. Tomemos, por ejemplo, la amígdala. Goldstein y otros han informado de que la amígdala es mayor en los hombres que en las mujeres. Y en la rata, las neuronas de esta región establecen más interconexiones en los machos que en las hembras. Sería de esperar que estas divergencias anatómicas se reflejaran en la reacción al estrés de machos y hembras. Con el fin de evaluar si las amígdalas de machos y hembras responden realmente de distinta forma ante el estrés, Katharina Braun y sus colaboradores de la Universidad Otto von Guericke de Magdeburgo, le retiraron durante un breve tiempo una camada degu a la madre. A estos roedores sociales, nativos de América del Sur, que viven en grandes colonias, como los perrillos de las praderas, la separación, incluso efímera, puede resultarles bastante turbadora. Se les midió la concentración de receptores de serotonina en diversas regiones del cerebro. La serotonina es un neurotransmisor, una molécula portadora de una señal nerviosa, que desempeña un papel clave en la determinación de la conducta emocional. (El fármaco Prozac realza la acción de la serotonina.)

Se permitió a las crías oír las llamadas de su madre durante el período de separación. Esa señal auditiva aumentaba la concentración de receptores de serotonina en la amígdala de los machos, pero rebajaba la concentración de tales receptores en las hembras. Aunque resulta difícil extrapolar al caso humano el comportamiento registrado en este estudio, si el resultado fuese válido para los bebés, la ansiedad de la separación afectaría de distinto modo al bienestar emotivo de los niños y de las niñas. Se requiere abundar en ejemplos de ese tenor si queremos averiguar por qué los desórdenes de ansiedad en las niñas son mucho más frecuentes que en los niños.

El hipocampo, estructura crucial para el almacenamiento de recuerdos y para la representación espacial, es otra de las regiones del cerebro de las que hoy sabemos que varían según el sexo, tanto anatómicamente como en su respuesta al estrés. Las imágenes obtenidas revelan que el hipocampo es mayor en las mujeres que en los hombres. Estas diferencias anatómicas podrían guardar relación con la distinta forma de proceder de hombres y mujeres al orientarse en un recorrido. Son muchos los estudios que demuestran que los hombres tienen mayor tendencia a guiarse mediante la estimación de distancias y orientaciones espaciales, mientras que las mujeres son más propensas a basarse en puntos concretos de referencia. Debe señalarse que en la rata se da una diferenciación sexual parecida; en las ratas resulta más probable que los macho se orienten por los laberintos valiéndose de informaciones direccionales o posicionales; las hembras tienden en cambio a guiarse por esos mismos laberintos valiéndose de los hitos de que dispongan. (No obstante, aún está por demostrar que los machos sean menos proclives que las hembras a plantearse por dónde debe irse.)

Incluso las neuronas del hipocampo se comportan de distinto modo en machos y en hembras, al menos en lo concerniente a las experiencias de aprendizaje. Por ejemplo, el equipo dirigido por Janice M. Juraska, de la Universidad de Illinois, ha demostrado que al situar ratas en un “ambiente enriquecido” —jaulas llenas de juguetes y de otros roedores para promover las interacciones sociales—, se produjeron efectos diferentes en la estructura de las neuronas del hipocampo de machos y hembras. En éstas, la experiencia hizo más “tupidos” los árboles dendríticos de las células, las estructuras ramificadas que reciben señales de otras neuronas. Cabe presumir que tal modificación refleja un aumento de conexiones neuronales que, se cree, participan en la fijación de los recuerdos. En los machos, sin embargo, la complejidad del ambiente no repercutió sobre los árboles dendríticos o incluso los podó ligeramente.

Pero esos machos aprenden a veces mejor en situaciones de estrés. El equipo de Tracey J. Shors, de la Universidad Rutgers, ha observado que una breve exposición a una serie de descargas eléctricas en la cola, de un segundo de duración, reforzaba la ejecución de una tarea aprendida y aumentaba la densidad de las conexiones dendríticas con otras neuronas en los machos; en las hembras, mermaba la calidad del ejercicio y disminuía la densidad de las conexiones. Las observaciones de ese tipo tienen derivaciones so-

ciales de interés. Cuanto más descubramos sobre las diferencias en los mecanismos de aprendizaje de cada sexo, más necesario puede que resulte pensar, trasladados a la especie humana, en cuáles serían los ambientes óptimos de aprendizaje para chicos y chicas.

Aunque el hipocampo de la rata hembra pueda presentar un decremento en la respuesta al estrés agudo, parece ser más flexible y adaptable que el del macho al enfrentarse al estrés crónico. El grupo dirigido por Cheryl D. Conrad, de la Universidad estatal de Arizona, encerró ratas durante seis horas en una caja de malla, situación que los roedores encuentran molesta e inquietante. Las investigadoras evaluaron después la morbilidad de las neuronas del hipocampo ante una neurotoxina, una medida estándar del efecto del estrés sobre estas células. Se observó que la limitación crónica volvía más sensibles a la toxina a las células del hipocampo de los machos; en cambio, no afectaba a la vulnerabilidad neuronal de las hembras. Estos descubrimientos, y otros parecidos, dan a entender que las hembras toleran mejor el estrés crónico que los machos, en el sentido de que les causa menos daños cerebrales. No está claro todavía qué protege a las células del hipocampo de la hembra de los efectos lesivos del estrés crónico, pero es muy probable que intervengan las hormonas sexuales.

La imagen de conjunto

Al ampliar el trabajo sobre la forma en que el cerebro maneja y recuerda acontecimientos estresantes, mis colaboradores y yo hemos encontrado que hombres y mujeres se diferencian en la forma en que fijan los recuerdos de incidentes que suscitan emociones. Por investigaciones con animales se sabe que el proceso en cuestión entraña la activación de la amígdala.

En uno de nuestros primeros experimentos con sujetos humanos, les mostramos a los voluntarios una serie de películas con imágenes de gran violencia; al propio tiempo medíamos su actividad cerebral mediante tomografía por emisión de positrones. Unas semanas más tarde les pasamos un cuestionario para averiguar qué recordaban.

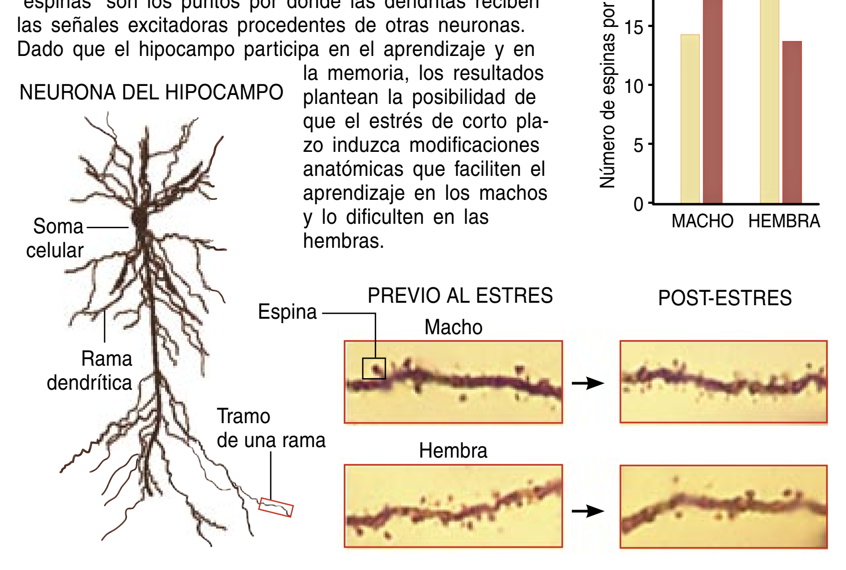
Descubrimos que el número de películas perturbadoras que recordaban estaba en correlación con el grado de actividad de la amígdala durante el visionado. Trabajos posteriores de nuestro laboratorio y de otros investigadores confirmaron esta observación de carácter general. Reparé, no obstante, en algo singular. En algunos estudios, la excitación de la amígdala sólo ocurría en el hemisferio derecho, y en otros, en el izquierdo. Fue entonces cuando me percaté de que, en los experimentos en que se excitaba la amígdala derecha, sólo participaban varones, y en aquellos en que se excitaba la izquierda, sólo mujeres. Desde entonces, han sido tres los estudios subsiguientes —dos de ellos, realizados por nuestro grupo, y uno de John Gabrieli y Turhan Canli y sus colaboradores de Stanford— que han confirmado esta diferenciación entre la forma en que los cerebros masculinos y femeninos gestionan los recuerdos emotivos.

EL HIPOCAMPO ESTRESADO

El hipocampo de las ratas macho reacciona de distinto modo que el de las hembras en estrés agudo o crónico.

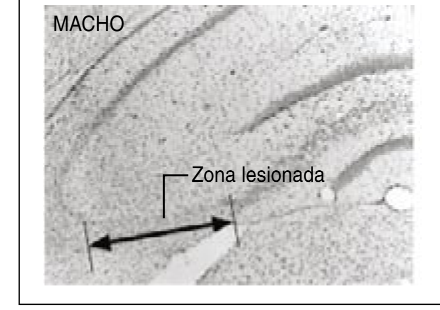
ESTRES AGUDO

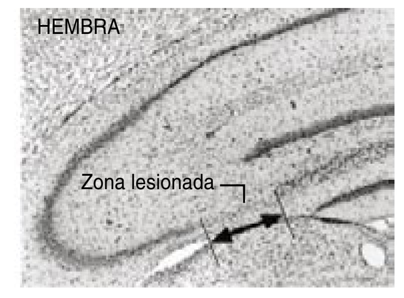
El estrés de breve duración provocó que la densidad de "espinas" dendríticas de las neuronas del hipocampo aumentase en los machos y disminuyese en las hembras (*micrografías y diagrama de barras*), según un estudio del equipo de Tracey J. Shors, de la Universidad Rutgers. Las "espinas" son los puntos por donde las dendritas reciben las señales excitadoras procedentes de otras neuronas. Dado que el hipocampo participa en el aprendizaje y en la memoria, los resultados plantean la posibilidad de que el estrés de corto plazo induzca modificaciones anatómicas que faciliten el aprendizaje en los machos y lo dificulten en las hembras.



ESTRES CRONICO

El estrés crónico, en cambio, puede tornar más vulnerable a la lesión el hipocampo de los machos. Cuando Cheryl D. Conrad, J. L. Jackson y L. S. Wise, de la Universidad estatal de Arizona, suministraron una neurotoxina a ratas estresadas de forma crónica, los machos, pero no las hembras, sufrieron más daño que las ratas del mismo sexo que sirvieron de control. Las micrografías al pie corresponden a sujetos estresados.

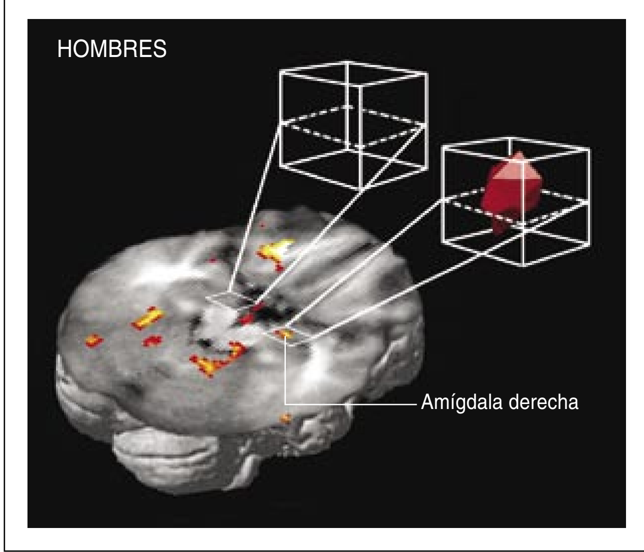


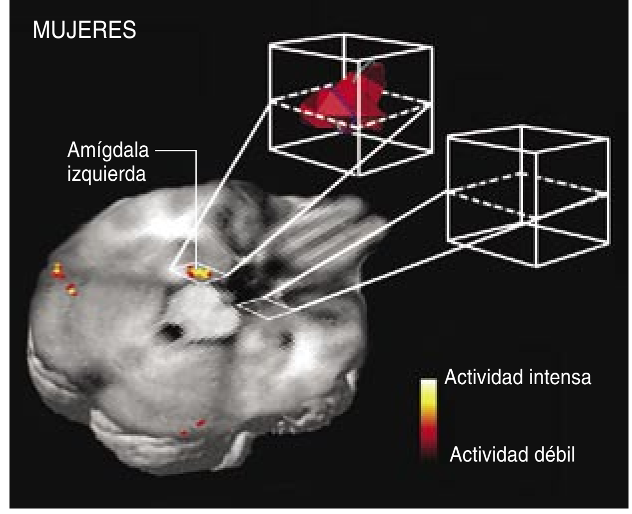


FUENTE: T. J. SHORS, J. FALDUTO Y B. LEUNER EN *EUROPEAN JOURNAL OF NEUROSCIENCE*, VOL. 19, PAGS. 145-150; ENERO DE 2004 (*arriba*);
FUENTE: CHERYL D. CONRAD *Universidad del Estado de Arizona* (*abajo*)

LA AMIGDALA Y LA MEMORIA EMOTIVA

En investigaciones realizadas por el autor y sus colaboradores, la amígdala, de importancia crucial para la recordación de sucesos emotivos, reaccionó en los varones de forma distinta de su comportamiento en las mujeres que contemplaron diapositivas con imágenes turbadoras, de la descomposición de un animal. Los hombres que manifestaron una respuesta intensa exhibieron la mayor actividad en la amígdala del hemisferio derecho (*escáner izquierdo y esquema*) y un recuerdo muy preciso al cabo de dos semanas, mientras que las mujeres más impresionadas y que demostraron mayor recordación exhibieron la mayor actividad en la amígdala izquierda (*a la derecha*). El equipo ha efectuado estudios más completos que sugieren que las diferencias de actividad hemisférica entre uno y otro sexo son responsables de que las mujeres recuerden más vivamente los detalles de un acontecimiento emotivo que los hombres; en cambio, es más probable que éstos conserven memoria de su esencia.



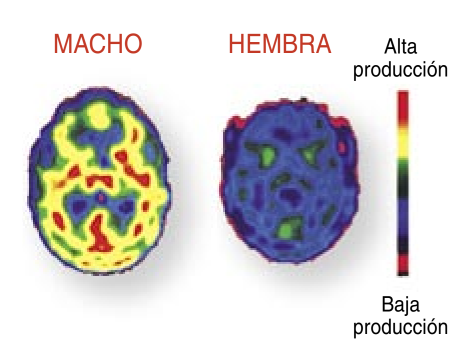


Al darnos cuenta de que el cerebro de varón difería del cerebro de mujer en la forma de procesar un mismo material provocador de emociones, nos preguntamos por el posible significado de tal disparidad. Para abordar tal cuestión, volvimos la mirada hacia una teoría centenaria que afirma que el hemisferio derecho se orienta hacia el procesamiento de los aspectos globales de cada situación, mientras que el izquierdo tiende a procesar los aspectos de detalle.

Si esa tesis fuera correcta, razonábamos, una droga que amortiguase la actividad de la amígdala debería mermar en el hombre la capacidad de recordar la esencia de una historia emotiva (al lastrar la amígdala derecha): en cambio, debería reducir la capacidad de una mujer de evocar los detalles precisos (al dificultar la función de la amígdala izquierda).

Una de tales drogas es el propranolol. Este fármaco, un betabloqueante, frena la actividad de la adrenalina y de la noradrenalina. Amortigua así la activación de la amígdala y dificulta la evocación de recuerdos emocionalmente perturbadores. Administramos esta droga a hombres y a mujeres antes de presentarles una breve secuencia fotográfica donde un niño sufría un horrible accidente mientras caminaba junto a su madre.

Al cabo de una semana, nos propusimos averiguar qué recordaban. Los resultados pusieron de manifiesto que a los hombres les costaba más acordarse de los aspectos holísticos, el núcleo, de la historia: el accidente mortal del niño, por ejemplo. En las mujeres, el propranolol provocó el efecto contrario: debilitó su recuerdo de los detalles más accesorios; por ejemplo, que el chico llevaba un balón de fútbol. En investigaciones recientes hemos descubierto que podemos detectar casi inmediatamente una diferencia en la actividad hemisférica de uno y otro sexo cuando reaccionan ante un estímulo emotivo. Al serles mostradas fotografías que suscitan emociones desagradables, los voluntarios reaccionan en el intervalo de 300 milisegundos (queda plasmado en un pico del registro de la actividad eléctrica del cerebro). Con Antonella Gasbarri y su grupo, de la Universidad de L'Aquila, hemos observado que esta rápida cresta, a la que se denomina respuesta P300, es más exagerada en el hombre cuando



TOMOGRAFIAS por emisión de positrones como éstas, obtenidas por Mirko Diksic y sus colaboradores de la Universidad McGill, revelan que la tasa de producción de serotonina es mayor en los cerebros humanos masculinos que en los femeninos. La serotonina influye en el estado anímico; este descubrimiento quizá contribuya a explicar por qué la depresión es más frecuente en la mujer que en el hombre.

LA POLEMICA DEL RECTOR DE HARVARD

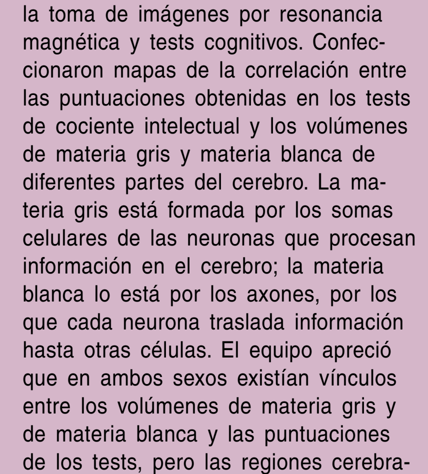
No hace mucho, Lawrence Summers, rector de la Universidad de Harvard, desató la polémica cuando planteó en el curso de una conferencia la posibilidad de que la biología cerebral contribuyera a explicar por qué hay menor número de mujeres que de hombres que destaquen en las carreras científicas. Nancy Hopkins, bióloga del Instituto de Tecnología de Massachusetts y asistente al acto, se sintió tan ofendida por las consideraciones de Summers, que abandonó la sala.

¿Qué datos aporta la investigación? Resulta difícil lograr pruebas que vinculen las desigualdades anatómicas con la capacidad intelectual. Para empezar, las diferencias en las puntuaciones atribuibles al sexo que hayan podido observarse en tests normalizados son insignificantes; favorecen a las mujeres en unos casos y a los hombres en otros. Y aunque las neurociencias están descubriendo una multitud de diferencias entre uno y otro sexo en lo que se refiere a la estructura y función del cerebro, nadie, por ahora, puede decir si tales diferencias tienen alguna influencia en que se triunfe en una carrera científica, o en caso de tenerla, cuál sería su peso en comparación con el de los factores culturales.

Cabe en lo posible, empero, que los cerebros femenino y masculino alcancen una misma inteligencia general por vías un tanto distintas. Un estudio reciente sugiere, por ejemplo, que hombres y mujeres podrían utilizar el cerebro de distinto modo al resolver problemas del estilo de los propuestos en los tests de inteligencia. En ese trabajo, Richard Haier y sus colaboradores de la Universidad de California en Irvine y la Universidad de Nuevo México combinaron barridos para la toma de imágenes por resonancia magnética y tests cognitivos. Confeccionaron mapas de la correlación entre las puntuaciones obtenidas en los tests de cociente intelectual y los volúmenes de materia gris y materia blanca de diferentes partes del cerebro. La materia gris está formada por los somas celulares de las neuronas que procesan información en el cerebro; la materia blanca lo está por los axones, por los que cada neurona traslada información hasta otras células. El equipo apreció que en ambos sexos existían vínculos entre los volúmenes de materia gris y de materia blanca y las puntuaciones de los tests, pero las regiones cerebrales que exhibían las correlaciones eran diferentes en hombres y en mujeres.

No se han replicado todavía los ensayos. Y aunque las observaciones se repitieran, los investigadores seguirán teniendo que vérselas con una cuestión no resuelta: ¿qué relación tienen tales diferencias —si tienen alguna— con la forma de razonar de hombres y mujeres?





LAWRENCE SUMMERS, rector de la universidad de Harvard, causó una gran polémica cuando atribuyó el menor número de mujeres en las facultades de ciencias a la diferente constitución de sus cerebros.

RICK FRIEDMAN *Corbis*

se registra el hemisferio derecho; en las mujeres, en cambio, es mayor cuando se toma el registro del izquierdo. Por consiguiente, las disparidades entre los dos sexos en la forma en que el cerebro procesa imágenes emotivas empiezan en los primeros 300 milisegundos, mucho antes de que los individuos tengan grandes posibilidades, si es que tienen alguna, de interpretar conscientemente lo que han visto.

De tales descubrimientos podrían derivarse consecuencias para el tratamiento del síndrome de estrés postraumático. Investigaciones anteriores realizadas por el grupo de Gustav Schelling, de la Universidad Ludwig Maximilian de Múnich, han establecido que ciertos fármacos, como el propranolol, reducen los recuerdos correspondientes a situaciones traumáticas cuando su administración forma parte de las terapias habituales en una unidad de cuidados intensivos.

Incitados por nuestros descubrimientos, los investigadores alemanes hallaron que, al menos en tales unidades, los betabloqueantes reducen el recuerdo de acontecimientos traumáticos en las mujeres, pero no en los hombres. Así pues, resulta posible que incluso en los cuidados intensivos los médicos deban tomar en consideración el sexo de sus pacientes cuando prescriban la medicación.

Diferencias en las enfermedades mentales

El síndrome de estrés postraumático no es la única alteración psicológica que parece manifestarse en hombres de distinta forma que en mujeres. Un estudio realizado con tomografía por emisión de positrones en la Universidad McGill por el grupo de Mirko Diksic puso de manifiesto que la producción de serotonina era nada menos que un 52 por ciento más elevada en el varón que en la mujer; quizás explique por qué las mujeres son más propensas a la depresión, enfermedad que se suele tratar con fármacos que refuerzan la concentración de serotonina.

Una situación parecida podría darse en las drogodependencias. En este caso, el neurotransmisor en cuestión es la dopamina, un compuesto que interviene en las sensaciones placenteras asociadas con las drogas de adicción. El equipo de Jill Becker, de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, descubrió que en las hembras de rata los estrógenos refuerzan la liberación de dopamina en regiones cerebrales que intervienen en la regulación del ansia de consumir drogas. Además, la hormona suscitaba efectos de larga duración: incrementaban la probabilidad de que las hembras siguieran anhelando cocaína semanas después de haber recibido la droga por última vez.

Tales diferencias en la susceptibilidad, especialmente a estimulantes como la cocaína y las anfetaminas, podrían explicar por qué las mujeres son más vulnerables a los efectos de estas drogas y por qué tienden

a progresar más deprisa que los hombres desde la iniciación hacia la dependencia.

Asimismo, ciertas anomalías cerebrales subyacentes a la esquizofrenia parecen también diferir de varón a mujer. Ruben Gur, Raquel Gur y sus colegas de la Universidad de Pennsylvania han invertido años en investigar las diferencias entre uno y otro sexo relativas a la anatomía y la función del cerebro. En uno de sus proyectos midieron las dimensiones de la corteza orbitofrontal, región que participa en la regulación de las emociones. Las compararon con el tamaño de la amígdala, que participa en la producción de reacciones emocionales.

Los investigadores observaron que las mujeres poseen una razón orbitofrontal/amígdala (ROA) significativamente mayor que los hombres. Ante semejante hallazgo, cabría conjeturar que las mujeres mostrarían, en promedio, mayor capacidad para controlar sus reacciones emotivas. En experimentos complementarios, los investigadores descubrieron que este "equilibrio" parece alterarse en la esquizofrenia, pero no de igual forma en mujeres y en hombres. Las mujeres que la sufren presentan una ROA menor que las sanas, acorde con lo esperable. Pero los hombres esquizofrénicos, curiosamente, tienen la ROA aumentada con relación a los sanos. Tales hallazgos, aunque siguen siendo desconcertantes, dan a entender que la esquizofrenia "femenina" difiere un tanto de la "masculina", y que el tratamiento de esta patología podría requerir una adaptación al sexo del enfermo.

La importancia de las diferencias sexuales

La Academia Nacional de Ciencias de los EE.UU., en un informe muy extenso, publicado en 2001, sobre el efecto de las diferencias entre los sexos en la salud humana, afirmaba: "...Se ha de tener en cuenta el sexo. El sexo, es decir, ser macho o hembra, constituye una variable elemental de importancia que habría que tomar en cuenta al diseñar y analizar estudios en todos los campos y en todos los niveles de investigación biomédica o que tengan relación con la salud".

Los neurocientíficos distan todavía de haber ensamblado todas las piezas, identificado todas las diferencias cerebrales ligadas a la pertenencia a uno o el otro sexo, y determinado con precisión su influencia en la cognición y la propensión a sufrir enfermedades originadas en el cerebro. No obstante, las investigaciones realizadas hasta la fecha demuestran que tales diferencias van mucho más allá del hipotálamo y de la conducta en el apareamiento. Ni los investigadores ni los clínicos ven siempre clara la mejor forma de desentrañar plenamente la influencia del sexo en el cerebro, en la conducta y en la respuesta a los medicamentos. Pero cada vez es mayor el número de neurocientíficos que descartan que se pueda evaluar sólo a uno de los sexos y obtener lecciones válidas sobre ambos.

El autor

Larry Cahill se doctoró en neurociencias en 1990 en la Universidad de California en Irvine. Pasó dos años en Alemania estudiando el aprendizaje y la memoria en los jerbos (una especie de roedores) mediante la toma de imágenes por resonancia magnética, y regresó a la Universidad de California en Irvine, donde es profesor asociado del departamento de neurobiología y miembro numerario del centro de neurobiología del aprendizaje y la memoria de esa universidad.

Bibliografía complementaria

SEX ON THE BRAIN: THE BIOLOGICAL DIFFERENCES BETWEEN MEN AND WOMEN. Deborah Blum. Viking Press, 1997.

MALE, FEMALE: THE EVOLUTION OF HUMAN SEX DIFFERENCES. David Geary. American Psychological Association, 1998.

CEREBRO DE VARÓN Y CEREBRO DE MUJER. Doreen Kimura en *Investigación y Ciencia*, págs. 76-84; noviembre, 1992.

EXPLORING THE BIOLOGICAL CONTRIBUTIONS TO HUMAN HEALTH: DOES SEX MATTER? Dirigido por Theresa M. Wizemann y Mary Loue Pardue. National Academy Press, 2001.

BRAIN GENDER. Melissa Hines. Oxford University Press, 2004.

Agujeros negros cuánticos

Quizá se creen pronto agujeros negros en el laboratorio

Bernard J. Carr y Steven B. Giddings

Desde que se inventaron los aceleradores de partículas hace casi ochenta años, se los ha utilizado para romper átomos, transmutar elementos, producir antimateria y crear partículas nunca vistas en la naturaleza. Pero con suerte quizás encaren enseguida un desafío que hará que esos logros parezcan casi vulgares. Los aceleradores podrían generar los objetos más misteriosos del universo: los agujeros negros.

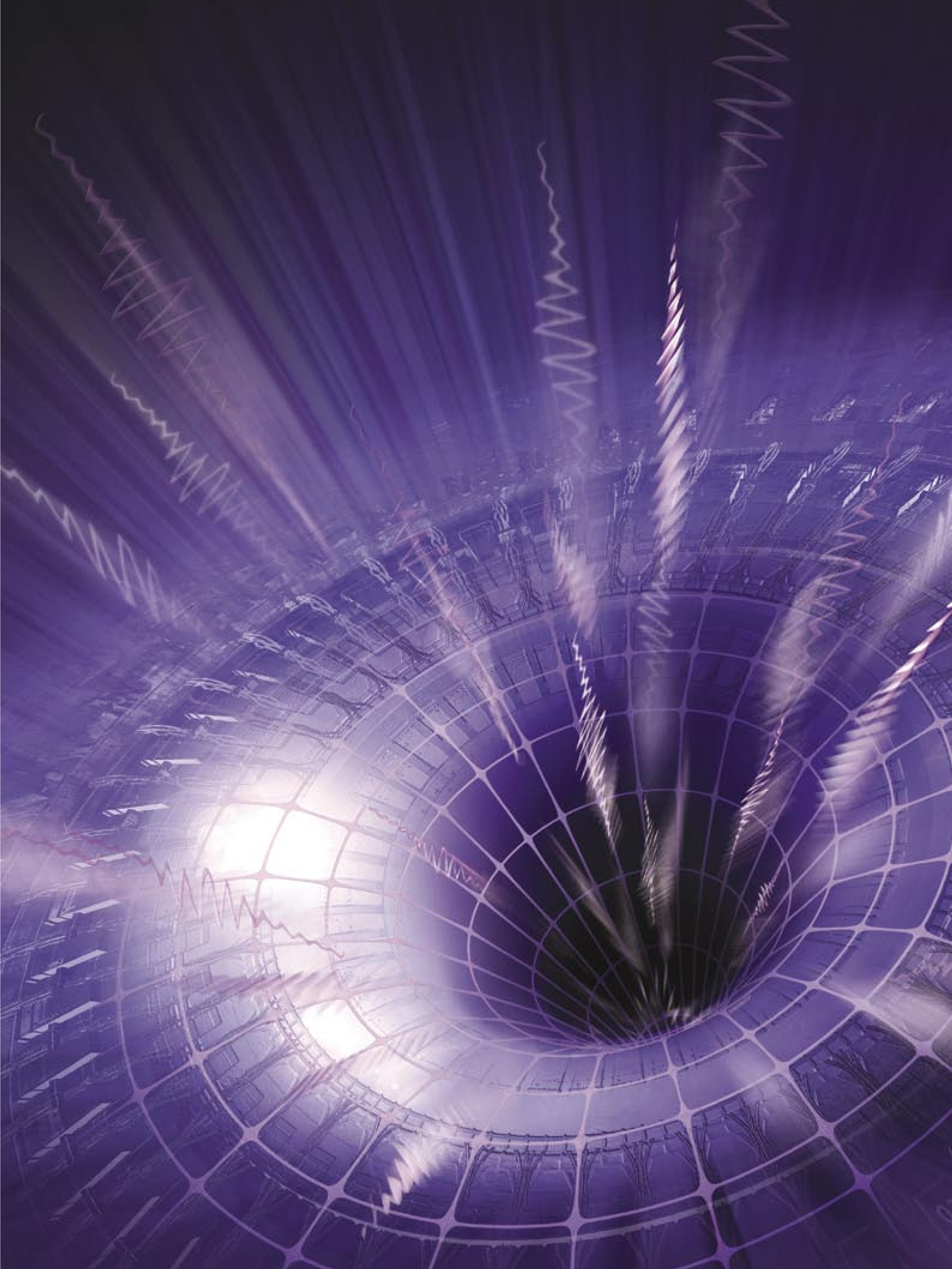
Cuando se piensa en agujeros negros, se suelen imaginar monstruos de masa enorme que se tragan naves espaciales, incluso estrellas enteras. Pero los agujeros que se producirían en los aceleradores de las más altas energías —quizá ya en el año 2007, cuando el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, cerca de Ginebra, empiece a funcionar— quedan muy lejos de esos gigantes astrofísicos. Serían microscópicos, comparables en tamaño a las partículas elementales. No desgajarían estrellas, no reinarían en las galaxias ni plantearían una amenaza a nuestro planeta, pero en algunos aspectos sus características resultarían aún más extraordinarias. A causa de efectos cuánticos, se evaporarían a poco de haberse formado y emitirían tal riqueza de partículas, que encenderían los detectores como árboles de Navidad. Gracias a los pormenores de esa desintegración, conoceríamos mejor el tejido del espaciotiempo y sus posibles dimensiones no observadas.

La compresión

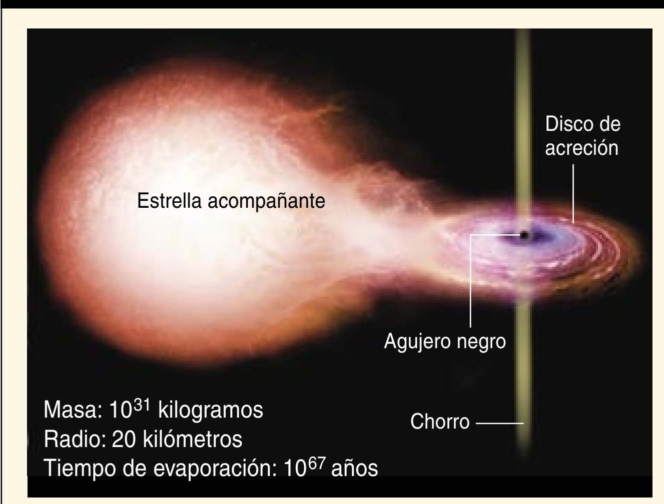
En su forma moderna, el concepto de agujero negro emerge de la teoría general de la relatividad de Einstein, que predice que, cuando la materia se comprime suficientemente, su gravedad llega a ser tan intensa, que delimita una región del espacio de la cual nada puede escapar. El límite de la región recibe el nombre de horizonte de sucesos del agujero negro: los objetos pueden atravesarlo para caer dentro del agujero, pero ninguno lo atravesará de nuevo para salir de ahí. En el caso más simple, en el que el espacio no tiene dimensiones ocultas o esas dimensiones son menores que el agujero, el tamaño de éste es directamente proporcional a su masa. Si se comprimiera el Sol hasta un radio de tres kilómetros, unas cuatro millonésimas de su actual tamaño, se convertiría en un agujero negro. Para que la Tierra tuviera el mismo sino, se necesitaría comprimirla hasta un radio de nueve milímetros, alrededor de una milmillonésima de su tamaño actual.

Así, cuanto más pequeño sea el agujero, más alto será el grado de compresión que se requerirá para crearlo. El grado de densidad a alcanzar por la materia comprimida crece con el inverso del cuadrado de la masa. Para un agujero de la masa del Sol, la densidad ronda los 10^{19} kilogramos por metro cúbico, muy por encima de la que se da en un núcleo atómico. Una tal densidad es la mayor que se puede crear por colapso gravitatorio en el universo de hoy. Un cuerpo más ligero que el Sol resistiría el

JEAN-FRANCOIS PODEVIN



AGUJEROS NEGROS GRANDES Y PEQUEÑOS



LOS AGUJEROS NEGROS ASTROFISICOS son, se cree, los cadáveres de estrellas de masa elevada que se derrumbaron bajo su propio peso. A medida que otra materia cae en ellos, liberan energía potencial gravitatoria, como si fuesen plantas hidroeléctricas cósmicas. Se trata de la única fuente de energía que explica los intensos rayos X y chorros gaseosos que surgen de distintas estructuras celestes, por ejemplo el sistema estelar binario de rayos X representado aquí.



LAS MASAS DE LOS AGUJEROS NEGROS MICROSCOPICOS llegan hasta la de un asteroide. Quizá los colapsos gravitatorios de la materia produjeron al principio de la gran explosión objetos de ese tipo. Si el espacio tiene dimensiones extra no observadas, podrían crearse también en las colisiones de partículas energéticas del universo actual. En vez de engullir materia, emitirían radiación y se desintegrarían enseguida.

colapso porque las fuerzas repulsivas cuánticas entre las partículas subatómicas lo estabilizarían. Las estrellas más ligeras que podrían llegar a convertirse en agujero negro cuentan con unas seis masas solares.

Sin embargo, el colapso estelar no es la única manera en que se crean agujeros. A principios de los años setenta, Stephen W. Hawking, de la Universidad de Cambridge, y uno de los autores (Carr) investigaron un mecanismo para generar agujeros en el universo primitivo, agujeros negros "primordiales". A medida que el espacio se expande, la densidad media de materia disminuye. Fue, pues, mucho más alta en el pasado, hasta el punto de que excedió de los niveles nucleares durante el primer microsegundo tras la gran explosión (*big bang*). Las leyes conocidas de la física permiten una densidad de materia de hasta 10^{97} kilogramos por metro cúbico, o densidad de Planck, la densidad a la cual la fuerza de la gravedad llegaría a ser tan intensa, que las fluctuaciones mecánico-cuánticas romperían el tejido del espacio-tiempo y crearían agujeros negros de sólo 10^{-35} metros (o longitud de Planck) con una masa de 10^{-8} kilogramos (o masa de Planck).

No puede haber un agujero negro más ligero que ése, según las formulaciones ordinarias de la gravedad. Pesa muchísimo más que una partícula elemental, con un tamaño muchísimo menor. A medida que iba disminuyendo la densidad cósmica se irían formando agujeros negros primordiales cada vez más pesados. Cualquiera más ligero que 10^{12} kilogramos todavía sería menor que un protón, pero más allá de esa masa los agujeros tendrían tamaños propios de los objetos que nos son familiares. Los que se formaron durante la época en que la densidad cósmica coincidía con la densidad nuclear tendrían una masa comparable con la del Sol y serían, por lo tanto, macroscópicos.

Las altas densidades del universo primitivo eran necesarias para la formación de agujeros negros primordiales, pero no suficientes. Para que una región dejara de expandirse y se

Resumen/Fábricas de agujeros negros

- Los agujeros negros no tienen por qué ser monstruos enormes, voraces. De las teorías físicas fundamentales se sigue que los hay de los tamaños más diversos, incluso menores que las partículas subatómicas. Los efectos cuánticos destruirían enseguida los agujeros minúsculos; los más pequeños estallarían en cuanto se formaran.
- Podría haber agujeros negros pequeños, residuos de las primeras etapas de la gran explosión, cuyo estallido ocurriría en el universo actual. Los instrumentos astronómicos lo observarían en algún caso.
- Los teóricos han propuesto recientemente que ciertas colisiones generarían en el universo actual agujeros negros pequeños, incluso en la Tierra. Se creía que las energías indispensables eran demasiado altas, pero si el espacio tiene dimensiones extra con las características adecuadas, el umbral de energía para la producción de agujeros negros será mucho más bajo de lo que se suponía. En tal caso, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN generará agujeros negros como los que ya se habrían estado creando en las colisiones de los rayos cósmicos en la alta atmósfera. Los agujeros permitirían estudiar las dimensiones adicionales del espacio.

DON DIXON

convirtiese en un agujero negro tenía que ser más densa que el promedio; es decir, se requerían también fluctuaciones de densidad. Se sabe que tales fluctuaciones existieron, por lo menos a escalas grandes, pues de lo contrario nunca se habrían ensamblado las galaxias y los cúmulos de galaxias. Para que se formaran agujeros negros primordiales, estas fluctuaciones tuvieron que ser más intensas a las escalas pequeñas que a las grandes, lo que es posible pero no inevitable. Incluso sin fluctuaciones podrían haberse creado agujeros espontáneamente, en varias transiciones de fase cosmológicas; por ejemplo, cuando el universo terminó su período primitivo de expansión acelerada, o inflación, o en la época de densidad nuclear, cuando se condensaron los protones en la sopa de sus quarks constituyentes. Por lo que se refiere a todas estas posibles vías de construcción de agujeros, una condición rigurosa han de cumplir los modelos del universo primitivo: al fin y al cabo, no fue tanta la cantidad de materia que terminó dentro de agujeros negros primordiales.

La evaporación

El haber comprendido que los agujeros podían ser pequeños alentó a Hawking a considerar qué efectos cuánticos les afectarían. En 1974 llegó a su famosa conclusión de que los agujeros negros no sólo tragan partículas, sino que también las escupen hacia el exterior [*véase* "La mecánica cuántica de los agujeros negros", por S. W. Hawking; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo, 1977]. Hawking predijo que un agujero radia térmicamente como un carbón caliente, con una temperatura inversamente proporcional a su masa. Para un agujero de masa solar, esa temperatura es de alrededor de una millonésima de kelvin, totalmente insignificante en el universo de hoy. Mas para un agujero negro de 10^{12} kilogramos, la masa de una montaña, es de 10^{12} kelvin, que le permitiría emitir partículas sin masa (fotones) y partículas con masa (electrones y positrones).

Como la emisión se lleva energía, la masa del agujero tiende a disminuir; de ahí la inestabilidad de un agujero negro. Mientras se contrae, se va calentando, emite partículas cada vez más energéticas y se contrae más y más deprisa. Cuando llega a una masa de unos 10^6 kilogramos, el juego se ha acabado: al cabo de un segundo, estalla con la energía de una bomba nuclear de un millón de megatones. El tiempo total para que un agujero negro se evapore es proporcional al cubo de su masa inicial. Para un agujero de masa solar, ese tiempo de vida es de 10^{64} años, una inmensidad inobservable. Para uno de 10^{12} kilogramos, es de 10^{10} años, aproximadamente la actual edad del universo. Por lo tanto, cualquier agujero negro primordial de dicha masa estaría terminando su evaporación y estallando ahora. Cualesquiera más pequeños, se habrían evaporado en una época cosmológica anterior.

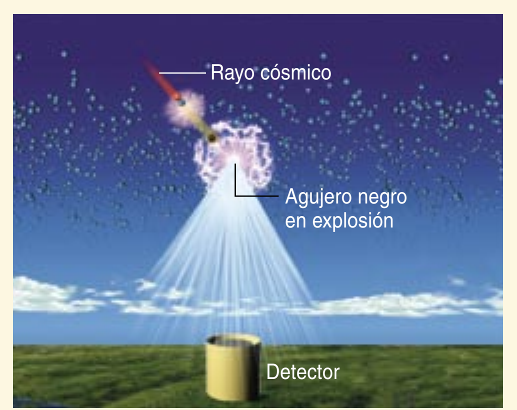
El trabajo de Hawking supuso un enorme avance conceptual porque relacionó tres áreas de la física hasta entonces dispares: la relatividad general, la teoría cuántica y la termodinámica. Fue también un paso hacia una teoría cuántica completa de la gravedad. Quizá nunca hubo agujeros negros primordiales; sin embargo, reflexionar sobre ellos condujo a notables resultados físicos. Incluso estudiar algo que quizá ni siquiera existe puede resultar provechoso.

En particular, el descubrimiento planteó una profunda paradoja, que apunta a la razón fundamental de que cueste tanto reconciliar la relatividad general y la mecánica cuántica. Según la teoría de la relatividad, la información sobre lo que cae en un agujero negro se pierde para siempre. Pero si el agujero se evapora, ¿qué sucede con la información que contiene en su interior? Hawking pensaba que los agujeros negros se evaporan totalmente y destruyen la información, en contradicción con los prin-

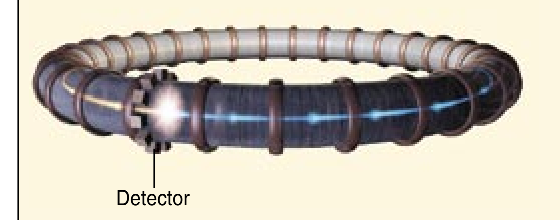
ASI PUEDE CREARSE UN MINIAGUJERO NEGRO



FLUCTUACIONES PRIMORDIALES DE DENSIDAD
Al comienzo de la historia de nuestro universo, el espacio estaba lleno de un plasma caliente y denso. La densidad variaba de un lugar a otro; donde la densidad relativa era suficientemente alta, el plasma pudo transformarse, tras su colapso gravitatorio, en un agujero negro.



COLISIONES DE RAYOS COSMICOS
Los rayos cósmicos —partículas muy energéticas provenientes de fuentes celestes— formarían agujeros negros en la atmósfera terrestre que, al explotar, emitirían un chorro de radiación y de partículas secundarias detectable en tierra.



ACELERADOR DE PARTICULAS
Un acelerador de gran energía, el LHC en concreto, estrellaría una partícula contra otra a una energía tal, que experimentarían un colapso gravitatorio y crearían un agujero negro. Los detectores detectarían su inmediata desintegración.

DON DIXON

NACIMIENTO Y MUERTE DE UN AGUJERO NEGRO

NACIMIENTO

Masa: 10 TeV

TIEMPO 0

En condiciones adecuadas, el choque de dos partículas (que aquí se representan como paquetes de ondas) creará un agujero negro. El agujero recién nacido será asimétrico. Podrá rotar, vibrar y tener carga eléctrica. (Los tiempos y las masas son aproximados: 1 TeV es la energía equivalente a unos 10^{-24} kilogramos.)

FASE DE CALVICIE

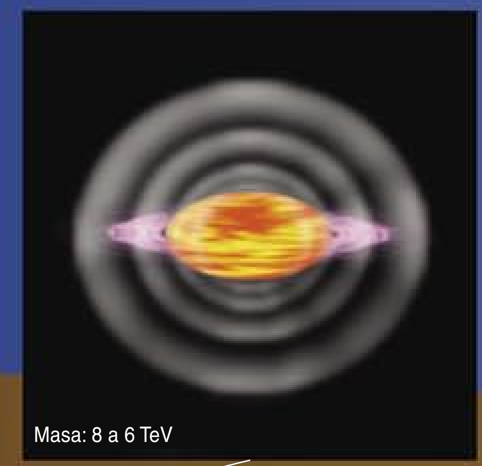


Masa: 10 a 8 TeV

0 a 1×10^{-27} segundos

A medida que progresa, el agujero negro emite ondas gravitacionales y electromagnéticas. Parafraseando al físico John A. Wheeler, el agujero pierde pelo: se convierte en un cuerpo casi sin rasgos distintivos, caracterizado sólo por la carga, la rotación y la masa. Incluso la carga se escapa rápidamente a medida que el agujero emite partículas cargadas.

FASE DE REDUCCION DEL GIRO



Masa: 8 a 6 TeV

1 a 3×10^{-27} segundos

El agujero negro ya no es negro: radia. Al principio, la emisión va a expensas del giro, de manera que el agujero se frena y adquiere una forma esférica. La radiación emerge principalmente del plano ecuatorial del agujero negro.

DON DIXON

cipios de la mecánica cuántica. La destrucción de la información choca con la ley de la conservación de la energía, de ahí que este panorama resulte difícil de aceptar.

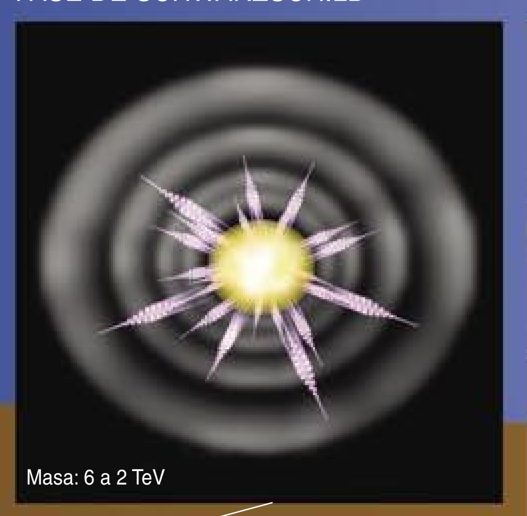
Una alternativa, que los agujeros negros dejen remanentes, repele igualmente. Para que estos remanentes codificasen toda la información que hubiese podido entrar en el agujero negro, tendrían que aparecer en una variedad infinita de tipos. Las leyes de la física predicen que el ritmo de producción de una partícula es proporcional al número de tipos de dicha partícula. Por lo tanto, los remanentes de los agujeros negros se producirían a un ritmo infinito; incluso procesos físicos diarios, como encender un horno de microondas, los generarían. La naturaleza sufriría una inestabilidad catastrófica. Hay una tercera posibilidad: que falle el principio de localidad, según el cual los acontecimientos que ocurren en puntos espacialmente separados se influyen entre sí sólo después de que la luz haya tenido tiempo para viajar entre ellos. Los teóricos siguen sin encontrar la respuesta [*véase* "Computación en agujeros negros", por Seth Lloyd e Y. Jack Ng; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2005].

La búsqueda

El progreso de la física requiere por lo general una cierta guía experimental. Las preguntas que plantean los agujeros negros microscópicos motivan su busca empírica. Cabría la posibilidad de que los astrónomos lograran detectar agujeros negros primordiales, dotados de una masa inicial de 10^{12} kilogramos estallaran en el universo actual. La mayor parte de la masa de estos agujeros se convertiría en rayos gamma. En 1976 Hawking y Don Page, por entonces en el Instituto de Tecnología de California, argumentaron que las observaciones del fondo de rayos gamma ponen límites superiores rigurosos al número de tales agujeros. No constituirían una proporción significativa de la materia oscura del universo y sus explosiones rara vez sucederían tan cerca como para que pudiésemos detectarlas. Sin embargo, a mitad de los años noventa David Cline, de la Universidad de California en Los Angeles, y sus colaboradores sugirieron que las erupciones de rayos gamma más cortas que se detectan en los cielos podrían atribuirse al estallido de agujeros negros primordiales. Aunque se piensa que las erupciones más largas están asociadas a explosiones o fusiones de estrellas, los sucesos cortos podrían tener otra explicación. Las observaciones futuras deberán resolver la cuestión. Sin embargo, la posibilidad de que las observaciones astronómicas capten las etapas finales de la evaporación de los agujeros negros resulta atractiva.

La producción de agujeros negros por los aceleradores de partículas es una posibilidad aún más apasionante. Cuando se trata de producir altas densidades, ningún dispositivo aventaja a los mayores aceleradores, el LHC y el Tevatrón del Laboratorio del Acelerador Nacional Fermi, cerca de Chicago. Estas máquinas aceleran partículas subatómicas, como los protones, a velocidades muy cercanas a la de la luz. Las partículas adquieren

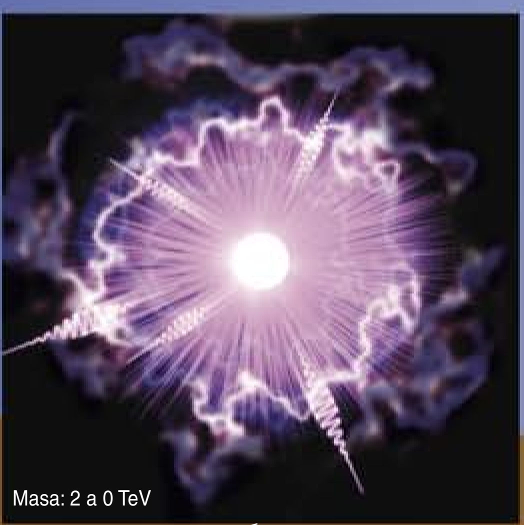
FASE DE SCHWARZSCHILD



3 a 20 × 10^{-27} segundos

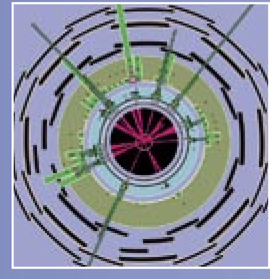
Cuando ha dejado de girar, el agujero negro es un cuerpo incluso más simple que antes, caracterizado solamente por la masa. Incluso ésta escapa, en forma de radiación y de partículas con masa que emergen en todas las direcciones.

FASE DE PLANCK



20 a 22 × 10^{-27} segundos

El agujero se acerca a la masa de Planck —la menor masa posible para un agujero, según la teoría actual— y se asoma a la nada. La teoría de cuerdas sugiere que el agujero empieza a emitir cuerdas, las unidades fundamentales de la materia.



DESINTEGRACION SIMULADA de un agujero negro que muestra la sección transversal de un acelerador y un detector de partículas. Desde el centro del tubo del acelerador (*círculo negro*) emergen las partículas (*rayos*) que quedan registradas por capas de detectores (*anillos concéntricos coloreados*).

C. M. HARRIS *Universidad de Cambridge* Y THE ATLAS COLLABORATION (*a la derecha*)

energías cinéticas enormes. El LHC impartirá a los protones energías de alrededor de siete teraelectronvolt (TeV). Según la famosa ecuación de Einstein $E = mc^2$, esta energía equivale a una masa de 10^{-23} kilogramos, unas 7000 veces la masa en reposo del protón. Cuando dos partículas chocan en esas condiciones frontalmente, su energía se concentra en una región minúscula del espacio. Cabe imaginar que, de vez en cuando, las partículas que choquen se acercarán tanto que formen un agujero negro.

Así expuesto, el argumento adolece del siguiente problema: una masa de 10^{-23} kilogramos cae lejos del valor de Planck de 10^{-8} kilogramos que, según la teoría ordinaria de la gravedad, caracteriza al agujero más ligero posible. Este límite inferior surge del principio de incertidumbre de la mecánica cuántica. Debido a que las partículas también se comportan como ondas, se difuminan a lo largo de una distancia que disminuye con el aumento de la energía: a las energías del LHC, unos 10^{-19} metros, la región más pequeña, pues, en que se puede empaquetar la energía de una partícula. Corresponde a una densidad de 10^{34} kilogramos por metro cúbico, alta aunque insuficiente para crear un agujero. Para que una partícula resultase a la vez tan energética y tan compacta como para crear un agujero negro, debería tener la masa de Planck, 10^{15} veces más allá de la energía del LHC. Los aceleradores podrían quizá producir objetos matemáticamente relacionados con los agujeros negros (y, según algunos teóricos, ya lo han hecho), pero los verdaderos agujeros quedarían fuera de su alcance.

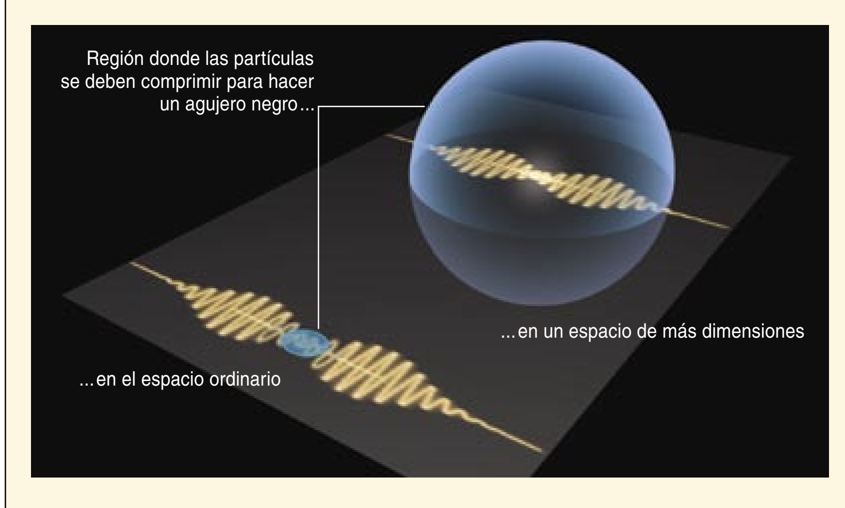
Las otras dimensiones

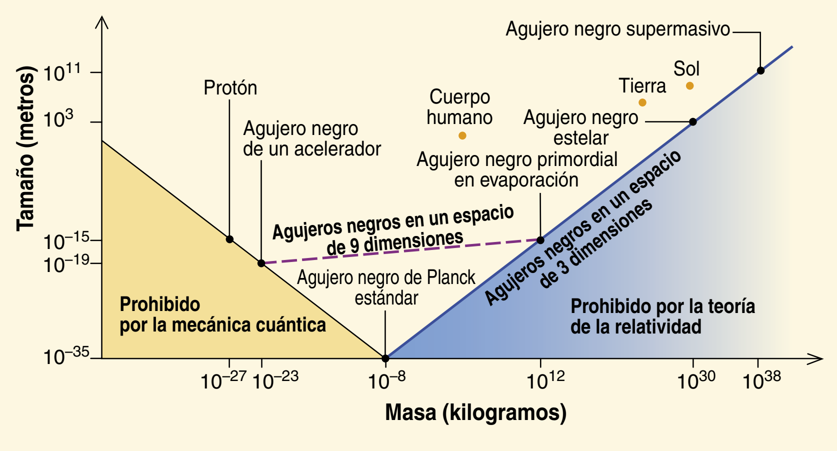
No obstante, a lo largo de los últimos años se ha ido viendo que el valor que se le atribuye a la densidad planckiana quizá peque de excesivo. La teoría de cuerdas, una de las principales competidoras en la pugna por obtener una teoría cuántica de la gravedad, predice que el espacio tiene más dimensiones que las tres usuales. La gravedad, al contrario que otras fuerzas, se propagaría por estas dimensiones y, en consecuencia, aumentaría inesperadamente de intensidad a distancias cortas. En tres dimensiones, la fuerza de la gravedad se cuadruplica cuando se divide por dos la distancia entre un par de objetos; en nueve, se multiplicaría por 256. Este efecto adquiriría relevancia especial si las dimensiones extra del espacio fuesen grandes. Se ha investigado a fondo esta posibilidad en años recientes [*véase* "Nuevas dimensiones para otros universos", por Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos y Georgi Dvali; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre 2000]. Hay también otras configuraciones de las dimensiones adicionales, las "compactaciones curvadas", que, con el mismo efecto de magnificar la gravedad, parecen aún más probables, al menos si la teoría de cuerdas es correcta.

Este vigoroso crecimiento de la fuerza de la gravedad significa que la verdadera escala de energía en la que las leyes de la gravedad y la mecánica cuántica chocan —y se forman agujeros negros— quedaría muy por debajo de su valor tradicional. Aun-

ES DIFICIL FABRICAR AGUJEROS

¿Cuánto hay que comprimir un pedazo de materia para que se convierta en un agujero negro? A mayor ligereza del cuerpo, mayor compresión se requerirá para que su gravedad alcance una intensidad tal, que lo convierta en un agujero. Los planetas o un cuerpo humano están más lejos del límite de compresión que las estrellas (*gráfico*). La naturaleza ondulatoria de la materia resiste la compresión; las partículas no se pueden comprimir en una región menor que su longitud de onda característica (*diagrama*); ningún agujero podría pesar menos de 10^{-8} kilogramos. Pero si el espacio tiene dimensiones adicionales, la gravedad sería intrínsecamente más intensa a distancias cortas y no tendría que comprimirse tanto el objeto. Esta posibilidad mantiene vivas las esperanzas de fabricar agujeros negros en un futuro próximo.





que ningún indicio experimental apoya esta posibilidad por el momento, la idea aporta luz sobre numerosos enigmas teóricos. Y si fuera verdad, la densidad requerida para crear agujeros negros se hallaría al alcance del LHC.

El estudio teórico de la producción de agujeros negros en colisiones de alta energía se remonta a los trabajos de Roger Penrose, de la Universidad de Oxford, a mitad de los añosa setenta, y de Peter D'Eath y Philip Norbert Payne, ambos entonces en Cambridge, a principios de los noventa. La ulterior hipótesis de las dimensiones adicionales grandes dio nueva vida a estas investigaciones y movió a Tom Banks, de la Universidad de California en Santa Cruz y de la Universidad Rutgers, y a Willy Fischler, de la Universidad de Texas, a efectuar un análisis preliminar en 1999.

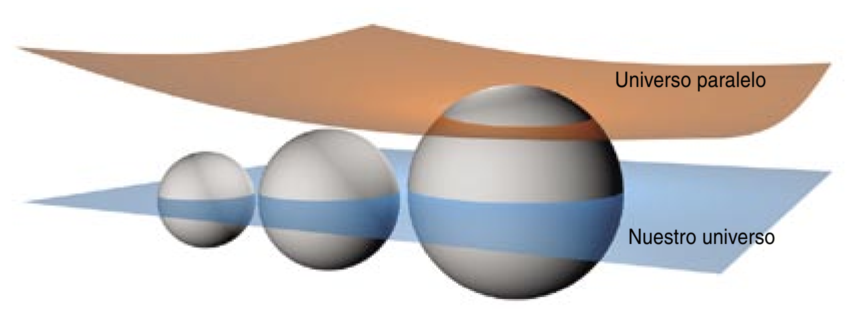
En un seminario del año 2001, uno de nosotros (Giddings) y Scott Thomas, de la Universidad de Stanford, por una parte, y por otra Savas Dimopoulos, de Stanford, y Greg Landsberg, de la Universidad Brown, describieron qué se observaría en un colisionador de partículas del estilo del LHC. Tras algunos cálculos, quedamos asombrados. A grandes rasgos, en las circunstancias más optimistas, correspondientes al valor admisible de la escala de Planck que la aleja menos de la nuestra, los agujeros negros se producirían a un ritmo de uno por segundo. Cuando un acelerador genera partículas a este ritmo se le llama "fábrica"; el LHC sería una fábrica de agujeros negros.

La evaporación de esos agujeros dejaría en los detectores señales muy reconocibles. Las colisiones típicas producen una cantidad discreta de partículas de alta energía, mientras que un agujero negro que se desintegrase radiaría un gran número de partículas en todas direcciones con energías muy altas, según se desprende de los cálculos de Hawking. Los productos de la desintegración incluirían todas las especies de partículas de la naturaleza. Varios grupos han realizado investigaciones pormenorizadas de las señales que los agujeros negros dejarán en los detectores del LHC.

Lluvia de agujeros negros

La perspectiva de crear agujeros negros en la Tierra parecerá a algunos una locura. ¿Cómo sabemos que en vez de desintegrarse, como Hawking predijo, no seguirían creciendo, hasta consumir el planeta entero? A primera vista, hay razones para preocuparse, sobre todo si se tiene en cuenta que algunos detalles del argumento original de Hawking quizá sean incorrectos, en especial la afirmación de que la información se destruye en los agujeros negros. Pero el razonamiento cuántico general implica que los agujeros negros microscópicos no serían estables; resultarían, pues, seguros. Las concentraciones de masa y energía, así una partícula elemental, son estables sólo si una ley de conservación prohíbe su desintegración; entre esas leyes figuran la de la conservación de la carga eléctrica y la del número bariónico (que, a menos que se viole de una u otra manera, asegura la estabilidad de los protones). No hay una ley de conservación que estabilice un agujero negro pequeño. En la teoría cuántica, todo lo que no se prohíbe expresamente es obligatorio.

DON DIXON; JANA BRENNING (*gráfica*)



AGUJEROS NEGROS DE DIVERSOS TAMAÑOS sondearían dimensiones adicionales; sin ese medio, nos resultarían inaccesibles. Como la gravedad se extiende en esas dimensiones, también lo hacen los agujeros negros. Cabría variar su tamaño ajustando los aceleradores de partículas a diversas energías. Si un agujero intersecciona un universo paralelo, se desintegrará antes y parecerá que libera menos energía (porque parte de la energía la absorberá ese otro universo).

DON DIXON

Por tanto, los agujeros negros pequeños se desintegrarían rápidamente, de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica.

Un argumento empírico corrobora que las fábricas de agujeros negros no plantearían ningún peligro. Colisiones de alta energía como las del LHC ya han ocurrido: en el universo primitivo e, incluso, ahora, cuando inciden en la atmósfera rayos cósmicos de energía suficientemente alta. De manera que si las colisiones a las energías del LHC pueden crear agujeros negros, la naturaleza ya los habrá estado produciendo inofensivamente justo sobre nuestras cabezas. Según las primeras estimaciones de Giddings y Thomas, los rayos cósmicos más energéticos —protones, o núcleos atómicos más pesados, con energías de hasta 10^9 TeV— generarían hasta cien agujeros negros en la atmósfera al año.

Además, Giddins y Thomas —junto con David Dorfan, de la Universidad de California en Santa Cruz, y Tom Rizzo, del Acelerador Lineal de Stanford, y, por otra parte, Jonathan L. Feng, de la Universidad de California en Irvine, y Alfred D. Shapere, de la Universidad de Kentucky— han descubierto que las colisiones de neutrinos cósmicos quizá produzcan aún más agujeros. Si es así, el nuevo observatorio de rayos cósmicos Auger, en Argentina, consagrado a la recogida de datos, y el renovado observatorio Fly's Eye, en Utah, captarían hasta varios agujeros al año. Estas observaciones, sin embargo, no evitarían la necesidad de experimentos en aceleradores, que generarían agujeros de manera más fiable, en mayor número y bajo circunstancias más controladas.

La producción de agujeros negros abriría toda una nueva frontera de la física. Su mera presencia ofrecería una prueba positiva de las dimensiones ocultas del espacio; observando las propiedades de los agujeros, se explorarían las características geográficas de las dimensiones. A medida que los aceleradores fabricaran agujeros negros de masa creciente, éstos explorarían más allá en las dimensiones extra y llegarían a tamaños comparables a los de una o más de ellas; ello conduciría a un cambio distintivo en la dependencia de la temperatura del agujero con la masa. Asimismo, si un agujero negro creciese tanto que entrara en intersección con un universo tridimensional paralelo en las dimensiones adicionales, sus características de desintegración cambiarían repentinamente.

La producción de agujeros negros en aceleradores representaría también el final de uno de los empeños históricos de la humanidad: llegar a conocer la materia a escalas cada vez más finas. A lo largo de los últimos cien años, la frontera de lo más pequeño se ha desplazado de las motas de polvo a los átomos, de éstos a los protones y a los neutrones y, por último a los quarks. Si se creasen agujeros negros en los aceleradores, se habría alcanzado la escala de Planck, la longitud significativa más corta, la distancia limitadora por debajo de la cual las nociones de espacio y longitud dejan de tener sentido. Cualquier tentativa de investigar la posible existencia de distancias menores mediante colisiones de alta energía daría lugar, sin remedio, a más agujeros negros. Las colisiones de alta energía, en vez de romper la materia en pedazos más finos, sólo generarían agujeros negros mayores. La generación de agujeros negros, por lo tanto, cerraría una frontera de la ciencia. Aparecería, eso sí, una nueva frontera, la de la exploración de la geografía de las dimensiones extra del espacio.

Los autores

Bernard J. Carr y Steven B. Giddings se conocieron en el congreso que, en 2002, celebraba el sexagésimo aniversario de Stephen W. Hawking. Carr enseña en el Colegio Queen Mary de la Universidad de Londres. Giddings es profesor de la Universidad de California en Santa Bárbara.

Bibliografía complementaria

BLACK HOLES AND TIME WARPS: EINSTEIN'S OUTRAGEOUS LEGACY. Kip S. Thorne. W. W. Norton, 1995.

HIGH ENERGY COLLIDERS AS BLACK HOLE FACTORIES: THE END OF SHORT DISTANCE PHYSICS. Steven B. Giddings y Scott Thomas en *Physical Review D*, vol. 65, trabajo N.º 056010; 2002. Disponible en arxiv.org/abs/hep-ph/0106219

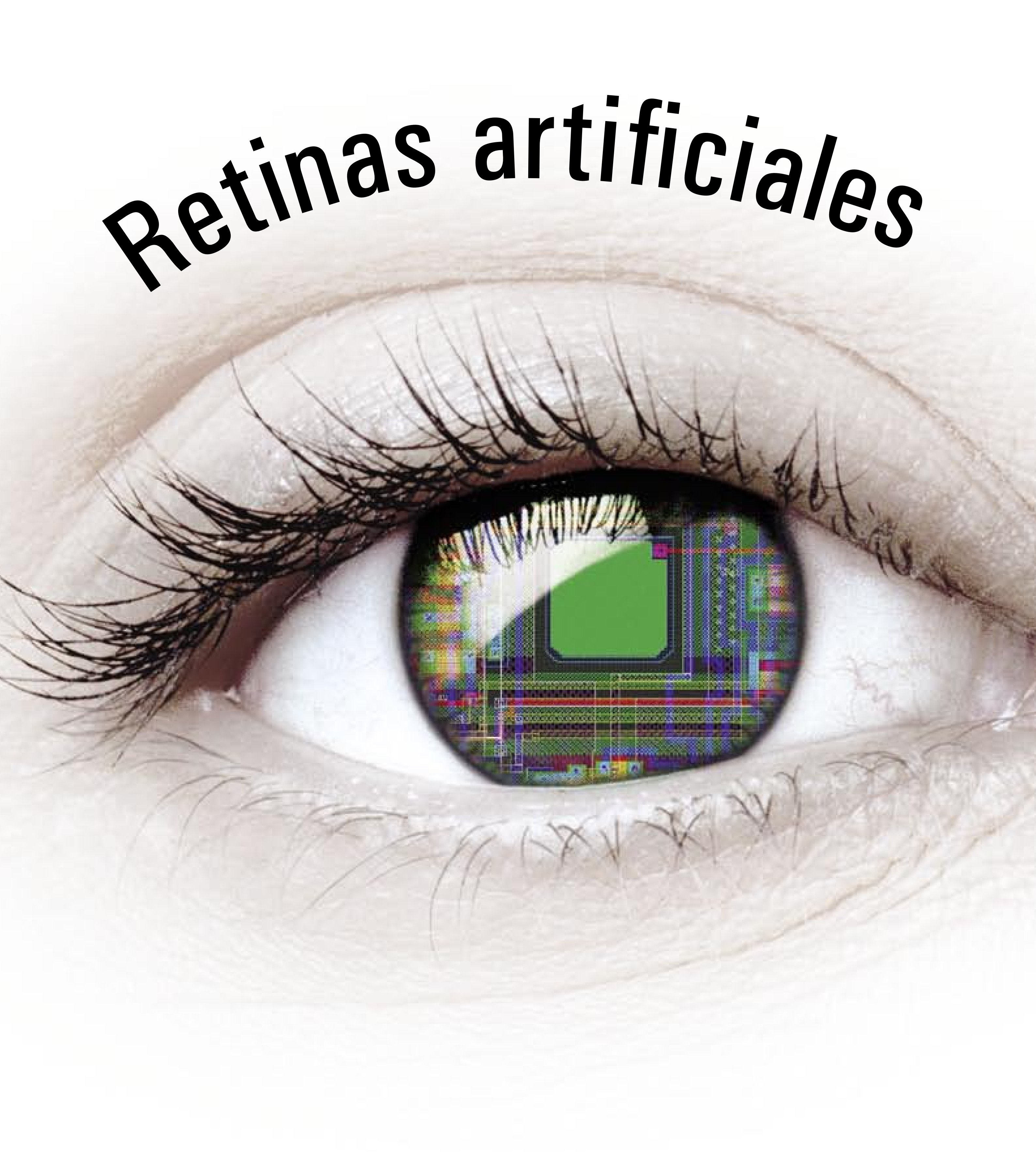
BLACK HOLES AT THE LHC. Savas Dimopoulos y Greg Landsberg en *Physical Review Letters*, vol. 87, trabajo N.º 161602; 2001. hep-ph/0106295

BLACK HOLES FROM COSMIC RAYS: PROBES OF EXTRA DIMENSIONS AND NEW LIMITS ON TEV-SCALE GRAVITY. Luis A. Anchordoqui, Jonathan L. Feng, Haim Goldberg y Alfred D. Shapere en *Physical Review D*, vol. 65, trabajo N.º 124027; 2002. hep-ph/0112247

BLACK HOLES AT ACCELERATORS. Steve Giddings en *The Future of Theoretical Physics and Cosmology*. Dirigido por G. W. Gibbons, E.P.S. Shellard y S. J. Rankin. Cambridge University Press, 2003. hep-th/0205027

PRIMORDIAL BLACK HOLES. Bernard Carr. Ibid. Trabajo parecido disponible en astro-ph/0310838

Retinas artificiales



Mediante microcircuitos compactos que remedan la estructura neuronal del cerebro podrían fabricarse retinas de silicio que restituyan la visión, ojos robotizados y otros sensores inteligentes

Kwabena Boahen

Cuando el superordenador *Deep Blue* de IBM derrotó al campeón mundial de ajedrez Gary Kasparov en una célebre partida disputada en 1997, lo hizo por pura superioridad física: la máquina evaluaba en un segundo unos 200 millones de jugadas posibles, mientras que su contrincante —de carne y hueso— analizaba tres, cuando más. Pese a esa victoria, los ordenadores no pueden competir con el cerebro humano en visión, audición, reconocimiento de patrones y aprendizaje. Por ejemplo, un ordenador no es capaz, como nosotros, de reconocer un amigo a lo lejos sólo por su forma de andar. Y en cuanto a eficacia operativa, no existe comparación posible: un superordenador estándar (de los que ocupan una sala entera) pesa 1000 veces más, ocupa un espacio 10.000 veces mayor y consume un millón de veces más energía que la masa de tejido nervioso, del tamaño de un melón francés, que constituye el cerebro humano.

¿Cómo se las arregla el cerebro, que transmite señales químicas entre neuronas con relativa lentitud (en milésimas de segundo), para desempeñar algunas tareas con mayor rapidez y eficacia que los procesadores digitales más potentes? La clave se encuentra en la forma que tiene el propio cerebro de organizar sus componentes eléctricos de actuación lenta.

El cerebro no ejecuta instrucciones codificadas, sino que activa conexiones, o sinapsis, entre neuronas. Cada una de estas activaciones equivale a la ejecución de una instrucción digital: se puede entonces comparar el número de conexiones que el cerebro activa en un segundo con el de instrucciones procesadas por un ordenador en ese mismo tiempo. Para igualar la asombrosa actividad sináptica (10^{16} conexiones neuronales por segundo), se necesitaría un millón de ordenadores con procesador Pentium de Intel —y centenares de megawatt para alimentarlos.

Se están logrando progresos notables en la copia de la organización y función de las neuronas. Se ha reproducido en silicio la "morfoestructura" de las conexiones neuronales, creando así microcircuitos (chips) neuromórficos. En un futuro, podrían fabricarse retinas de silicio para invidentes y procesadores de sonido para sordos, capaces de durar treinta años con una sola batería de nueve volt, así como chips de alta eficacia y bajo coste para el reconocimiento visual, acústico u olfativo para robots y otras máquinas inteligentes.

En nuestro equipo de la Universidad de Pennsylvania, empezamos por construir una réplica en silicio de la retina, esa lámina de tejido de medio milímetro de espesor que tapiza el fondo del ojo. Con sus cinco capas especializadas de neuronas, la retina "preprocesa" las imágenes visuales recibidas para extraer información útil sin exigir un gran esfuerzo al cerebro. Elegimos la retina por tratarse de un sistema sensorial harto conocido, sobre todo su anatomía. El siguiente paso consistió en reproducir el mecanismo que configura el desarrollo de esos circuitos biológicos; a ese proceso le llamamos metamórfico.

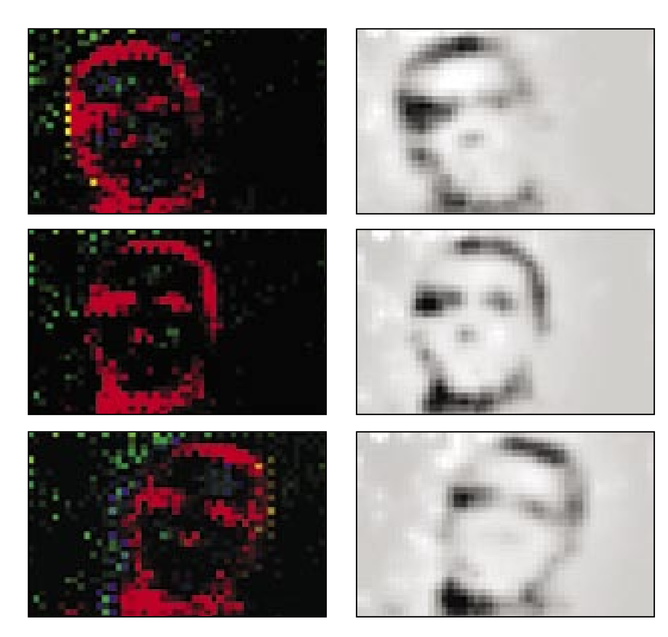
Neuromorfismo de la retina

Las células ganglionares de la retina —cercanas al millón— comparan las señales visuales recibidas de fotorreceptores, reunidos en grupos que van desde la media docena hasta varios cientos: cada grupo interpreta lo que sucede en una pequeña porción del campo visual. A medida que en un sector determinado cambia la intensidad luminosa u otra característica de la imagen, cada célula ganglionar transmite impulsos eléctricos ("espigas") al cerebro a través del nervio óptico. La excitación es proporcional al cambio relativo de la intensidad luminosa en el espacio o en el tiempo, no al nivel absoluto de intensidad que recibe. Así, la sensibilidad de la neurona mengua según crece la intensidad de la luz, a fin de acomodarse, por ejemplo, a una luminosidad que desde el alba hasta el mediodía aumenta en cinco órdenes de magnitud.

Misha Mahowald, biólogo, y Carver Mead, experto en microelectrónica, dieron en el Instituto de Tecnología de California (Caltech) los primeros pasos para reproducir la retina en soporte de

1. UNA RETINA IMPLANTABLE DE SILICIO (idealizada aquí por el artista) podría emular la función natural del ojo, restituyendo la visión a pacientes que sufran ciertos tipos de ceguera.

STONE (*ojo*); KAREEM ZAGHLOUL (*gráfico de la retina*); JEN CHRISTIANSEN (*montaje fotográfico*)



2. LA RETINA DE SILICIO detecta los movimientos de cabeza laterales del investigador. Los cuatro tipos de células ganglionares de silicio del chip Visio1 emulan la capacidad de las células retinianas reales para preprocesar la información visual sin exigir prolijas computaciones. Una clase de células responde a las zonas oscuras (*rojo*), mientras que otras reaccionan a las luminosas (*verde*). Un conjunto distinto de células sigue los bordes anteriores de los objetos (*amarillo*) y los posteriores (*azul*). Las imágenes en escala de grises, generadas por decodificación de estos mensajes, muestran lo que vería una persona ciega con implante de retina neuromórfica.

silicio. El resultado de este trabajo pionero: una réplica electrónica de las tres primeras capas de la retina [*véase* "La retina de silicio", por Misha A. Madowald y Carver Mead; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1991]. Otros investigadores —algunos de los cuales, como el propio autor, pasaron por el laboratorio de Mead en el Caltech— han reproducido las siguientes etapas del sistema visual, así como del sistema auditivo. En 2001, cuando

Resumen/Microchips neuromórficos

- Los ordenadores realizan miles de millones de operaciones por segundo. Pero no pueden competir con las personas en reconocimiento de figuras o procesamiento visual. El cerebro humano es millones de veces superior también en rendimiento energético y mucho más compacto que un ordenador personal.
- Los microcircuitos neuromórficos, inspirados en la estructura neuronal, ofrecen un notable ahorro energético. Su eficiencia podría permitir el desarrollo de retinas artificiales aptas para implantarse en personas que sufren ciertos tipos de ceguera, así como sensores electrónicos de mejor calidad.
- Los chips neuromórficos podrían llegar algún día a remedar los mecanismos de crecimiento autorregulado que el cerebro utiliza para desarrollar su asombrosa gama de funciones.

realizaba el doctorado en mi laboratorio, Kareem Zaghloul construyó réplicas de las cinco capas de la retina; ello permitió emular los mensajes visuales que envían al cerebro las células ganglionares, las neuronas de salida de la retina. Su retina de silicio, el chip Visio1, reproduce las respuestas de los cuatro tipos principales de células ganglionares, que forman el nervio óptico y en conjunto constituyen el 90 por ciento del mismo.

Zaghloul representó la actividad eléctrica de cada neurona en los circuitos oculares mediante un voltaje de salida individual. Dicho voltaje controla la corriente conducida por los transistores que conectan un determinado punto del circuito con los demás puntos, mimetizando la forma en que el cuerpo modula las respuestas de las sinapsis nerviosas. La luz detectada por los fotosensores electrónicos afecta al voltaje en ese punto del circuito de forma análoga al influjo ejercido sobre una célula correspondiente de la retina real. Embaldosando su chip con copias de este circuito básico, Zaghloul logró reproducir la actividad de las cinco capas celulares de la retina.

El chip emula el modo en que los canales iónicos, activados por voltajes, provocan en las células ganglionares —y en las neuronas del resto del cerebro— la descarga de espigas. Para conseguirlo, Zaghloul instaló transistores que realimentan corriente al mismo punto del circuito. Al recibirse esta corriente realimentada, el voltaje vuelve a crecer, lo que a su vez atrae más corriente y aumenta la amplificación. Una vez alcanzado cierto nivel inicial, se acelera el efecto regenerador; éste eleva el voltaje hasta su nivel máximo, provocando la descarga de una espiga.

A 60 miliwatt, el chip neuromórfico de Zaghloul consume 1000 veces menos energía que un ordenador personal. Dado su bajo consumo, esta retina de silicio podría servir de base a una prótesis enteramente intraocular, con cámara, procesador y estimulador implantados dentro del ojo de un invidente afectado por retinitis pigmentosa o degeneración macular, afecciones ambas que dañan los fotorreceptores, pero respetan las células ganglionares. Las prótesis retinianas en desarrollo (en la Universidad de California del Sur, por ejemplo) proporcionan el tipo de sensación visual llamada fosfeno: la realidad se percibe como una retícula de puntos luminosos, evocada al estimular las células ganglionares con microelectrodos implantados en el interior del ojo. Requieren llevar encima un ordenador para procesar las imágenes captadas por una videocámara sujeta a las gafas del paciente. Dada la pequeñez de la red de microelectrodos (menos de 10 por 10 píxeles), el paciente experimenta una visión túnel que le obliga a mover la cabeza para explorar la escena.

Ese problema desaparecería si se utilizara el propio ojo como cámara; además, las salidas de las 3600 células ganglionares de nuestro chip deberían proporcionar una visión cuasinormal. Habrá, sin embargo, que refinar los materiales de encapsulado biocompatibles y las interfaces de simulación para conseguir una prótesis de alta fidelidad, tal vez hacia el 2010. Asimismo, será preciso lograr una mayor comprensión de cómo los diversos tipos de células retinianas responden a los estímulos y la manera de contribuir éstas a la percepción. Entre tanto, los chips neuromórficos hallarían aplicación como



EXPERTOS EN ELECTRONICA NEUROMORFICA

Mediante microchips que remedan la estructura del cerebro, se pretende cerrar la brecha que separa los sensores electrónicos de las redes neuronales humanas. Estos trabajos se centran en sistemas de pequeños sensores susceptibles de implantarse en el cuerpo o instalarse en robots.

INSTITUCION	INVESTIGADORES	PROYECTOS
Universidad Johns Hopkins	Andreas Andreou, Gert Cauwenberghs, Ralph Etienne-Cummings	Reconocedor de voz alimentado por batería, generador de cadencia para locomoción y cámara que extrae las particularidades de un objeto
ETH Zúrich (Universidad de Zúrich)	Tobi Delbruck, Shi-Chii Liu, Giacomo Indiveri	Retina de silicio y chip de atención que selecciona automáticamente las regiones dominantes de una escena visual
Universidad de Edimburgo	Alan Murray, Alister Hamilton	Nariz artificial y reconocimiento automático de olores basado en la distribución temporal de los impulsos eléctricos (espigas) de señalización
Instituto de Tecnología de Georgia	Steve DeWeerth, Paul Hasler	Generadores de cadencia acoplados que coordinan un robot multisegmentado
HKUST, Hong Kong	Bertram Shi	Procesador binocular para percepción de profundidad y seguimiento visual
Instituto de Tecnología de Massachusetts	Rahul Sarpeshkar	Procesador de sonido para implantación coclear en pacientes sordos
Universidad de Maryland	Timothy Horiuchi	Chip de sonar inspirado en el sistema de ecolocación de los murciélagos
Universidad de Arizona	Charles Higgins	Chip sensor de movimiento inspirado en la visión de la mosca

sensores en automoción o seguridad, en robótica y en automatización fabril.

Metamorfismo de las conexiones neuronales

El notable ahorro energético que ofrecía la retina artificial neuromórfica me hizo reflexionar sobre el elevado rendimiento operativo del cerebro. Veinte años atrás, Mead ya había predicho que, aun cuando siguiera cumpliéndose la ley de Moore (según la cual el número de transistores por pulgada cuadrada en los circuitos integrados se duplica cada 18 meses), los ordenadores —como hoy los conocemos— nunca llegarían a igualar la eficacia del cerebro humano. Pero, ¿cómo si no podría lograrse? Hace ocho años empecé a vislumbrar la respuesta.

Comprendí que la eficacia operativa de un sistema depende de la capacidad de adaptación del equipo físico (*hardware*) a la tarea que ha de realizar. Los ordenadores habituales no admiten tales ajustes; lo que varía según las necesidades es el soporte lógico (*software*). El ordenador emplea unas pocas herramientas generales, aplicables a todos los trabajos; los programas informáticos se limitan a cambiar el orden en que éstas se usan. Por el contrario, el cerebro y los chips neuromórficos sí cuentan con un soporte físico flexible: uno y otros están programados al nivel de las conexiones individuales. Adaptan la herramienta a cada tarea concreta. Cabe entonces preguntarse cómo el cerebro se adecua a sí mismo. Si pudiéramos trasladar al silicio esos procesos metamórficos, obtendríamos chips neuromórficos que se automodificarían en función de la tarea; no sería ya necesario recurrir a la ingeniería inversa para descubrir los circuitos cerebrales. Comencé, pues, a estudiar el desarrollo neuronal, con la esperanza de averiguar de qué modo el organismo produce las herramientas precisas.

La construcción de la red neuronal del cerebro —un billón (10^{12}) de neuronas conectadas mediante diez mil billones (10^{16}) de sinapsis— constituye una tarea sobrecogedora. Aunque el ADN humano contiene el equivalente a un millardo (10^9) de bits de información, esa cantidad no basta para especificar a dónde han de dirigirse tales neuronas y cómo deben conectarse. El cerebro emplea su información genética en las primeras fases del desarrollo, pero la personalización prosigue mediante interacciones neuronales e interacciones con el mundo exterior. En otras palabras, las neuronas sensoriales establecen ellas mismas sus conexiones, forman tendidos en respuesta a estímulos sensoriales. La regla general que rige este proceso sorprende por su simplicidad: las conexiones se forman entre las neuronas que se activan a la par. Es decir, de todas las señales que recibe, una neurona acepta las que proceden de neuronas que se mantienen activas mientras ella también lo está e ignora todas las restantes.

Para conocer cómo se cablean entre sí (tendido) las capas de neuronas, se ha estudiado en las ranas la proyección retinotectal, que conecta la retina al tectum (región del cerebro medio que procesa las señales procedentes de los órganos sensoriales). Se ha descubierto así que el cableado entre una y otra capa de neuronas se establece en dos etapas. En la primera, una neurona recién nacida extiende unas proyecciones ("brazos") a la manera de un árbol ramificado. El brazo que más crece se convierte en el axón, el cable de salida de la célula; el resto operan como dendritas, los cables de entrada. El axón continúa creciendo, arrastrado por una estructura ameboidea en su extremidad. Dicha estructura, el cono de crecimiento, es sensible a los gradientes químicos generados por los precursores de las señales de comunicación neuronal, que se abren paso, guiando el axón hacia una cierta "calle" de la "ciudad" celular del tectum pero sin precisar el "número de la casa".

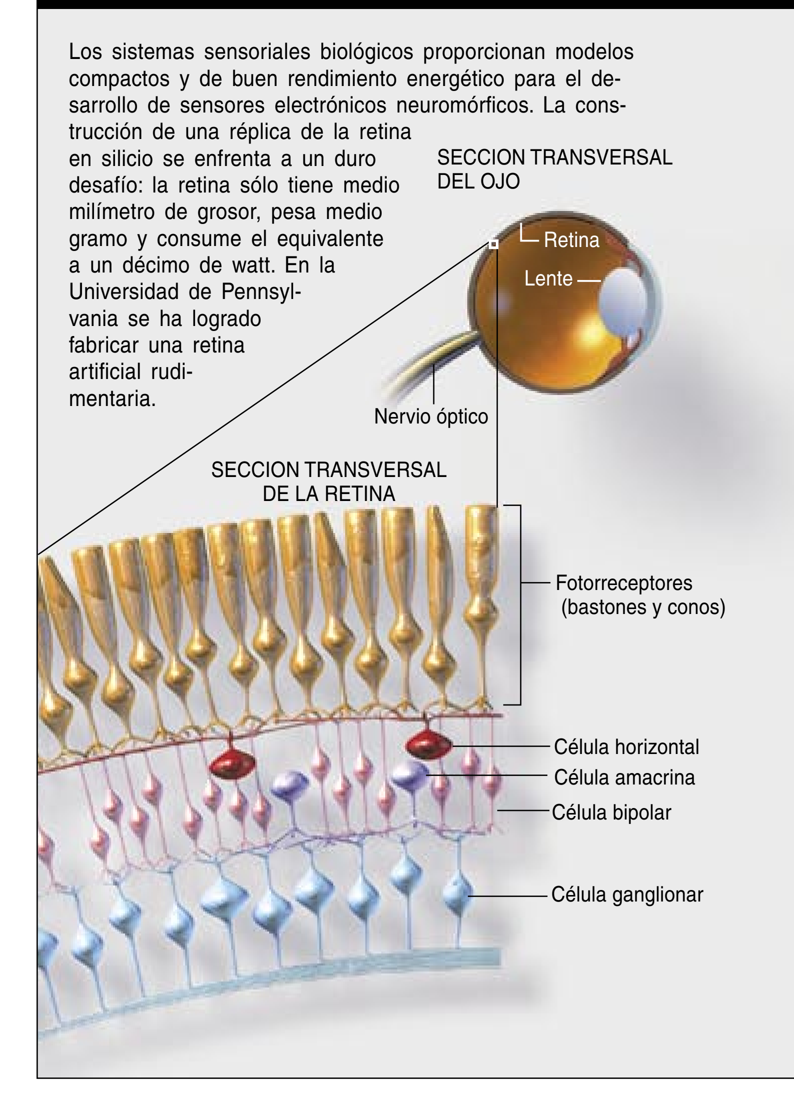
Afinar la puntería hasta la exacta localización en el tectum requiere una segunda etapa, de la que aún se desconocen los detalles. Es bien sabido, sin embargo, que las células ganglionares adyacentes en la retina tienden a activarse de forma conjunta. Ello me hizo sospechar

que el axón podría encontrar en el tectum las células vecinas en la retina siguiendo el rastro que marcan los agentes químicos emitidos por las neuronas tectales activas, puesto que serían las células vecinas el origen más probable de esa pista. Una vez que el axón toma contacto con el árbol dendrítico de la neurona tectal, se forma una sinapsis. Las neuronas que se activan a la par quedan así cableadas.

En 2001, Brian Taba, doctorando de mi laboratorio, construyó un chip inspirado en esta faceta del desarrollo cerebral. Al no poder redirigir los conductores metálicos, decidió redirigir las espigas. Aprovechamos que el chip Visio1 de Zaghloul emite una única dirección de 13 bits cada vez que una de sus 3600 células ganglionares produce un impulso. Transmitir direcciones en lugar de impulsos eléctricos, o espigas, evita verse limitado por el número de terminales de entrada/salida del chip. El chip receptor decodifica luego las direcciones, lo que regenera el impulso en la localización correcta dentro del mosaico neuronal de silicio. Mediante esta técnica se produce un haz virtual de axones que une localizaciones correspondientes en los dos chips: la versión en silicio de un nervio óptico. Sustituir una dirección por otra equivale a redirigir un axón virtual de una neurona (la dirección original) a otra (la nueva dirección). Estos "cables virtuales" (*softwires*) pueden redirigirse a cualquier destino mediante el almacenamiento de las sustituciones en una base de datos (tabla de consulta) y el uso de la dirección original para recuperarlas.

En el chip tectal de Taba, el Neurotrope1, los cables virtuales activan circuitos sensibles al gradiente (conos de crecimiento en silicio), así como neuronas de silicio adyacentes, situadas en las celdillas de un retículo. Cuando están activadas, esas neuronas liberan en el retículo —diseñado para conducir a la manera de un transistor— cargas eléctricas que se difunden de modo muy parecido a como lo hacen, a través del tejido nervioso, los agentes químicos liberados por las células tectales. Los conos de crecimiento detectan esta difusión de sustancias simulada y, mediante la actualización de la tabla de consulta, orientan su cableado virtual siguiendo el gradiente hacia la neurona de silicio que origina la carga. Dado que la carga debe ser liberada por la neurona de silicio y detectada al propio tiempo por el cono de crecimiento, en Neurotrope1 —lo mismo que en el tejido neuronal real— las conexiones se establecen entre las neuronas que se activan a la par.

Partiendo de un cableado aleatorio entre el chip Visio1 y el chip Neurotrope1, Taba logró emular la tendencia a la activación conjunta de las células ganglionares retinianas adyacentes mediante la activación aleatoria de pequeños grupos de células ganglionares de silicio. Tras haber estimulado miles de estos grupos, observó un cambio radical en el cableado virtual que conectaba ambos chips: las células ganglionares artificiales se cableaban ahora a neuronas del tectum de silicio el doble de próximas que las iniciales. A causa del ruido y la variabilidad, sin embargo, el cableado no llegaba a ser perfecto: los terminales de células adyacentes en la retina de silicio no acababan en posiciones contiguas en el tectum de silicio. Queríamos conocer, pues, cuál es la génesis de los patrones de cableado que sustentan las funciones biológicas corticales.



BRYAN CHRISTIE DESIGN; KAREEM ZAGHLOUL (*retina de silicio*)

Una vez más, buscábamos en la naturaleza inspiración para refinar nuestros sistemas artificiales.

Mapas corticales

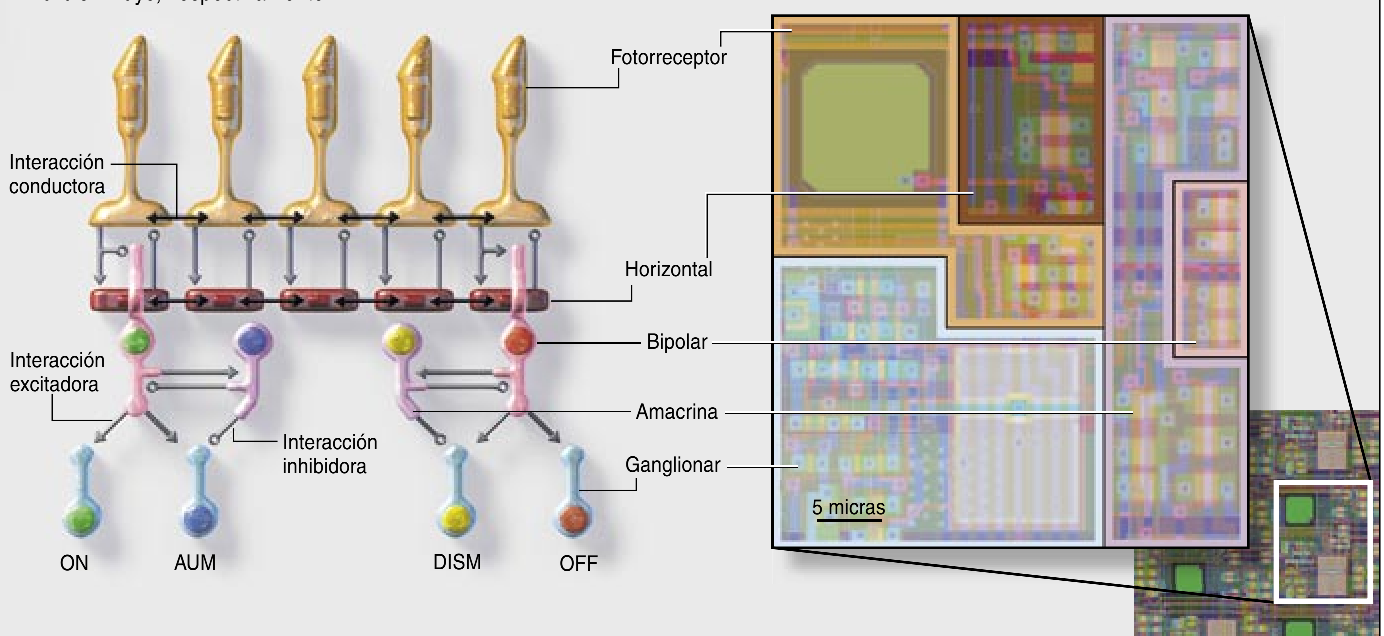
Para ello tuvimos que ahondar en el conocimiento actual sobre las conexiones en la corteza cerebral (córtex), la zona responsable del proceso cognitivo. Como si de una obra de papiroflexia se tratara, la superficie del córtex, de 40 centímetros de diámetro, se pliega para ajustarse al interior del cráneo. Sobre este lienzo, se trazan durante la infancia "mapas" del mundo exterior. El ejemplo mejor estudiado es la región V1 (el córtex visual primario), por donde entran al córtex los mensajes visuales procedentes del nervio óptico. En la V1 no sólo se cartografían la anchura y la longitud de una imagen, sino también la orientación de los bordes de los objetos que en ella aparecen. De ahí que las neuronas de esta región respondan mejor a bordes orientados a determinados ángulos: líneas verticales, horizontales, etcétera. Las mismas preferencias de orientación se repiten más o menos a cada milímetro, lo que permite detectar la orientación de los bordes en distintos sectores de la escena visual.

RETINIANAS Y CHIPS DE VISION NEUROMORFICOS

RETINA BIOLOGICA
Las células retinianas, que están interconectadas, extraen información del campo visual enrolándose en una complicada maraña de señales excitadoras (*flechas de sentido único*), inhibidoras (*palos rematados en círculo*) y conductoras o bidireccionales (*flechas de doble sentido*). Esta circuitería genera las respuestas selectivas de los cuatro tipos de células ganglionares (*abajo*) que constituyen el 90 por ciento de las fibras del nervio óptico que transmiten información visual al cerebro. Las células ganglionares *On* (de “encendido”, *verde*) y *Off* (de “apagado”, *rojo*) elevan su ritmo de impulsos de activación cuando la intensidad de la luz local es mayor o menor que la circundante. Las células ganglionares *Aum* (*azul*) y *Dism* (*amarillo*) emiten un impulso cuando dicha intensidad aumenta o disminuye, respectivamente.

RETINA DE SILICIO
Los circuitos neuromórficos emulan las complejas interacciones que se establecen entre los diversos tipos de células retinianas, sustituyendo por conductores metálicos los axones y dendritas (vías de señalización) de cada célula, y por un transistor cada sinapsis. Las permutaciones de esta disposición producen interacciones excitadoras e inhibidoras que mimetizan las comunicaciones entre neuronas. Sobre los chips de silicio se disponen los transistores y los conductores que los interconectan. Diversas regiones de la superficie del chip realizan las funciones de las diferentes capas celulares. Los cuadrados verdes grandes representan fototransistores, que transforman luz en electricidad.





David Hubel y Torsten N. Wiesel, neurobiólogos galardonados con el premio Nobel por su descubrimiento del mapa de la región V1 en los años sesenta, propusieron un diagrama de cableado —a nuestro parecer, sobrecogedor— para construir un córtex visual. En su modelo, cada célula cortical está conectada a dos grupos de células del tálamo que operan como retransmisoras de las señales retinianas dirigidas al córtex. Un grupo de células del tálamo deberá responder a la detección de zonas de sombra (emuladas en Visio1 por las células *Off*, de “apagado”), mientras que el otro (emulado por las células *On*, de “encendido”) reaccionará a la detección de luz. Para hacer que una célula cortical prefiera los bordes verticales, por ejemplo, ambos grupos de células habrán de disponerse en columnas verticales pero ligeramente desplazadas entre sí, con las células *Off* justo a la izquierda de las *On*. De ese modo, el borde vertical de un objeto del campo visual activará todas las células *Off* y todas las células *On* cuando se halle en la posición correcta. Un borde horizontal, en cambio, activará sólo la mitad de las células en cada grupo. Ante la presencia de un borde vertical, pues, la célula cortical recibirá una señal de intensidad doble y, por tanto, responderá con mayor vigor.

Al principio, el detalle exigido por esos patrones de cableado nos impresionó: debíamos conectar cada célula según su preferencia de orientación y cambiar después estos patrones de forma sistemática, de tal modo que las preferencias de orientación variasen paulatinamente al propio tiempo que las células adyacentes tuviesen preferencias similares. Lo mismo que en el córtex, las mismas orientaciones debían repetirse a cada milímetro; además, estas células de silicio debían conectarse a las células vecinas en la retina. Pero los conos de crecimiento de Taba no admitían tal complejidad. A finales de 2002, buscamos el modo de desterrar esa pesadilla: fuimos a hallar respuesta en un experimento de cincuenta años atrás.

En los años cincuenta, Alan M. Turing demostró que del ruido aleatorio surgían de forma espontánea patrones ordenados, como las manchas del pelaje de un leopardo o de una vaca. Confiábamos en que un mecanismo parecido sirviera para crear en nuestro chip regiones adyacentes con patrones de orientación similares. Según la idea de Turing —que él mismo probó en simulaciones ejecutadas

en uno de los primeros computadores electrónicos en la Universidad de Manchester— las células epiteliales del modelo segregarían indiscriminadamente tinte "oscuro" o "claro". Introduciendo variaciones entre las mismas, de modo que produjeran tinte oscuro y claro en cantidades ligeramente diferentes, Turing generó motas, manchas y hasta rayas como las de la cebra. Estas pequeñas diferencias iniciales se agrandaban, aclarando u oscureciendo, para crear patrones del tipo "todo o nada". Decidimos averiguar si ese principio era aplicable también a los mapas corticales.

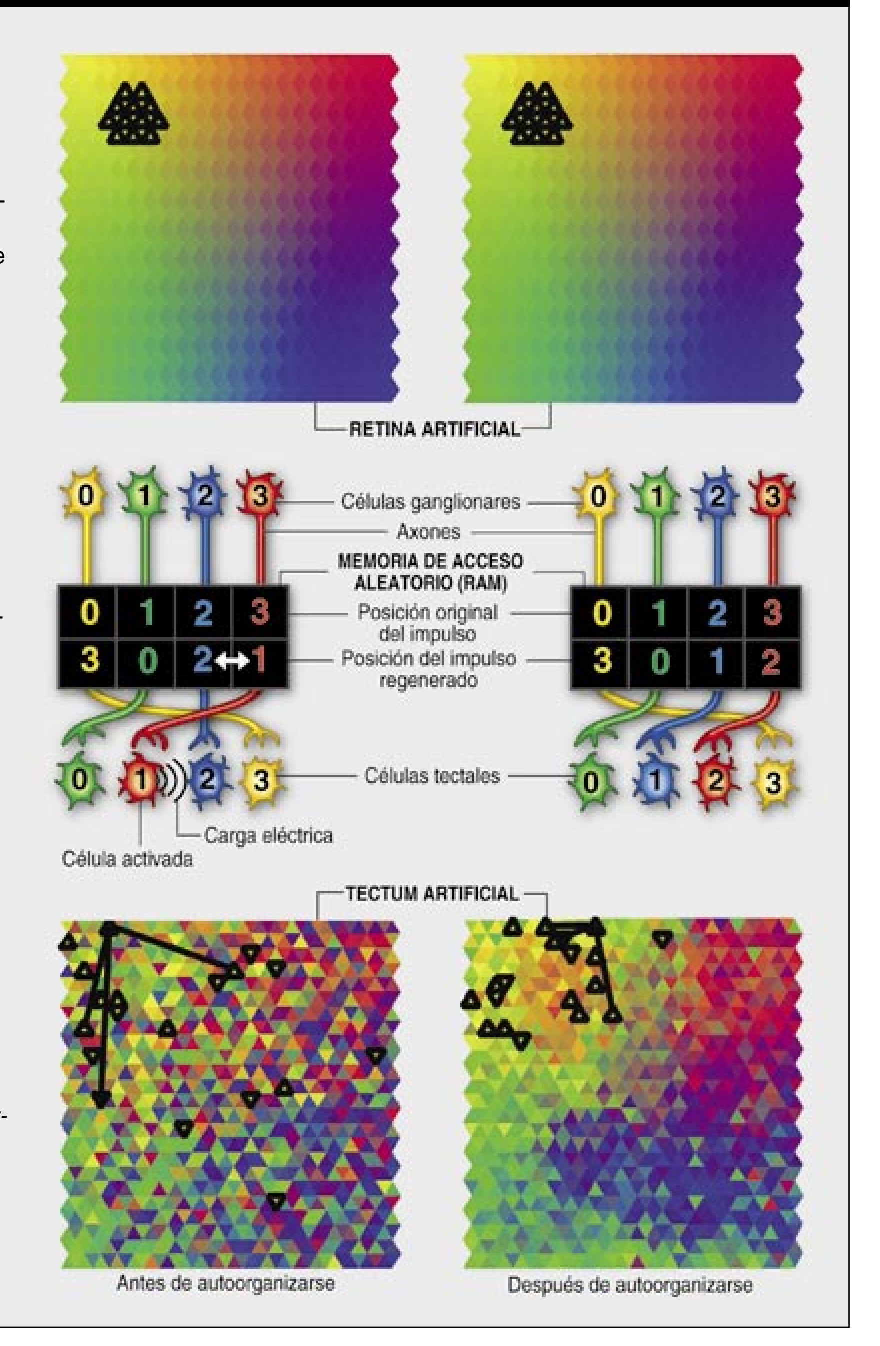
Hace cuatro años, Misha Tsodyks y sus compañeros del Instituto Weizmann de la Ciencia en Rehovot, demostraron, mediante simulaciones por ordenador, que un proceso similar generaría mapas de tipo cortical. Paul Merolla, otro doctorando de mi laboratorio, asumió el reto de aplicar este algoritmo autoorganizativo al silicio. Sabíamos que las impurezas químicas (dopaje) introducidas durante la fabricación de los microcircuitos caían al azar, ocasionando variaciones entre transistores que de otro modo serían idénticos. Confiamos en que ese fenómeno captaría el carácter aleatorio de la expresión génica en la naturaleza; se supone que a ello se debe que la distribución de las manchas varíe de un leopardo a otro y que los patrones de los mapas de orientación varíen de una persona a otra. Aunque las células que

ASI SE FORMAN LAS CONEXIONES (BIOLOGICAS O SILICEAS)

En las primeras fases del desarrollo ocular, las células ganglionares de la retina proyectan axones hacia un centro sensorial del cerebro medio: el tectum. Estos axones se guían por el rastro de agentes químicos liberados por células tectales vecinas también activas, de manera que las neuronas que se conectan son las que se activan a la par. Por fin se forma en el mesencéfalo un mapa de la organización espacial de los sensores retinianos.

Los expertos en neuromorfismo de la Universidad de Pennsylvania han logrado emular este proceso mediante "cables virtuales" (*softwires*) que autoorganizan conexiones entre las células de su chip de retina en silicio, Visio1 (*arriba*), y las del chip de tectum artificial, Neurotrope1 (*abajo*). Los impulsos eléctricos producidos, o espigas, cursan desde las células ganglionares a las células tectales, valiéndose de un chip de memoria de acceso aleatorio (RAM) (*centro*). El chip retiniano suministra la dirección de la neurona de silicio emisora del impulso; el chip tectal regenera ese impulso en la localización correspondiente. En el ejemplo, el tectum artificial ordena a la RAM que permute las direcciones de entrada 1 y 2: el terminal del axón de la célula ganglionar 2 se traslada entonces a la célula tectal 1, desplazando de esa posición el axón de la célula ganglionar 3. Los axones "perciben" el gradiente de carga eléctrica que libera una célula tectal de silicio activada; ello ayuda a guiar las conexiones.

Tras activar repetidamente grupos de neuronas vecinas en la retina artificial de silicio (*triángulos resaltados, arriba a la izquierda*), las terminaciones de los axones de las células tectales —al principio muy dispersas (*triángulos resaltados, abajo a la izquierda*)— se aproximan, lo que produce franjas más uniformes en un mapa cromático (*abajo a la derecha*).

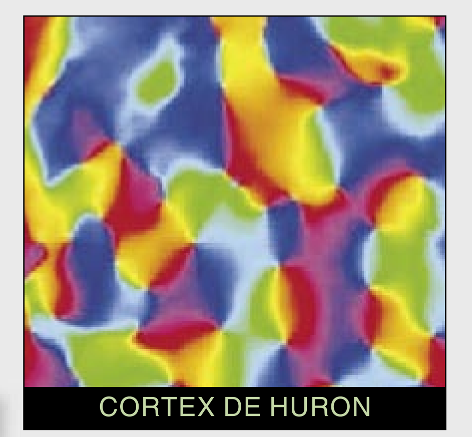


BRIAN TABA Y JEN CHRISTIANSEN

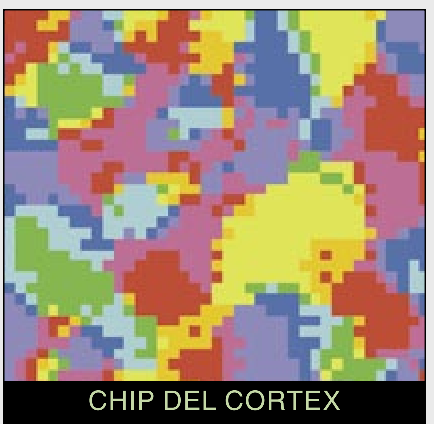
PREFERENCIAS DE ORIENTACION EN EL CEREBRO Y EN EL MICROCHIP

En el córtex visual de un hurón y en un chip neuromórfico del córtex, se ha cartografiado la posición de las células que responden preferentemente a ciertas orientaciones de los bordes de objetos (*clave, abajo*). En uno y otro mapa las células adyacentes tienden a mostrar preferencias de orientación similares, demostrando así que el córtex artificial emula el sistema biológico.





CORTEX DE HURON



CHIP DEL CORTEX

crean tales patrones en la naturaleza expresen genes idénticos, producen cantidades distintas del correspondiente colorante o de las proteínas que conforman los canales iónicos.

Inspirado en esa analogía, Merolla diseñó una neurona de silicio; luego unió varias copias de la misma para crear un mosaico con conexiones excitadoras e inhibidoras de tipo neuronal entre células adyacentes, que se encargaban de "oscurecer" o "aclarar". Cuando activamos los nuevos chips en 2003, aparecieron patrones de actividad que recordaban las manchas de un leopardo. Se observó la activación de distintos grupos de células al presentarles bordes con diversas orientaciones. Marcando con diferentes colores las localizaciones de estos grupos, obtuvimos mapas de preferencias de orientación similares a los formados en la zona V1 de las crías de hurón.

"Cerebros" de silicio

Tras obtener la versión en silicio de las cinco capas de la retina, nos propusimos hacer lo mismo con las seis capas que componen el córtex visual. Por ahora ya hemos dado un primer paso: hemos creado un modelo de la capa IV, la entrada al córtex visual, a fin de obtener un mapa de preferencias de orientación en forma inmadura. El espesor del córtex, sin embargo, es cinco veces mayor que el de la retina; por tanto, reproducir sus seis capas requiere circuitos integrados con bastantes más transistores por unidad de superficie.

En la actualidad, es posible integrar un millón de transistores y 10 metros de cable en un milímetro cuadrado de silicio. A finales de este decenio, la densidad de un chip será sólo diez veces menor que la densidad del tejido cortical (el córtex tiene cien millones de sinapsis y tres kilómetros de axones por milímetro cúbico).

Aunque se logre igualar el microcircuito al córtex en cuanto al número total de dispositivos integrados, habrá que ver cómo se manejan mil millones de transistores en un centímetro cuadrado de silicio. Para obtener estos nanochips de densidad elevada por los métodos estándar, deberán ampliarse los recursos humanos dedicados a tal empresa. Hasta la fecha, la multiplicación por 10.000 del número de transistores integrados en los microprocesadores de Intel ha venido acompañada por un aumento en cien veces más del número de ingenieros dedicados al diseño. En comparación, la simple duplicación del número de genes al pasar de la mosca al ser humano ha permitido que la evolución construyera cerebros con un número de neuronas diez millones de veces superior. Un mayor refinamiento en los procesos de desarrollo posibilitó un aumento de la complejidad a partir de una receta relativamente sencilla. Del mismo modo, emular el desarrollo neuronal en vez de limitarse a remedar los circuitos neuronales ofrece mayores esperanzas de domeñar la complejidad en los sistemas nanoelectrónicos del futuro.

MARCOS FRANK (*hurón*); PAUL MEROLLA (*chip*)

El autor

Kwabena Boahen enseña bioingeniería en la Universidad de Pennsylvania. Natural de Ghana, en 1985 inició sus estudios de ingeniería eléctrica e informática en la Universidad Johns Hopkins. Poco después comenzó a interesarse por las redes neuronales. Trata de aplicar el refinamiento de los sistemas neuronales a los diseños en silicio.

Bibliografía complementaria

ANALOG VLSI AND NEURAL SYSTEMS. Carver Mead. Addison Wesley, 1989.

TOPOGRAPHIC MAP FORMATION BY SILICON GROWTH CONES. Brian Taba y Kwabena Boahen en *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 15. Preparado por Suzanna Becker, Sebastian Thrun y Klaus Obermayer. MIT Press, 2003.

OPTIC NERVE SIGNALS IN A NEUROMORPHIC CHIP. Kareem A. Zaghloul y Kwabena Boahen en *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 51, n.º 4, págs. 657-675; 2004.

A RECURRENT MODEL OF ORIENTATION MAPS WITH SIMPLE AND COMPLEX CELLS. Paul Merolla y Kwabena Boahen en *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 16. Preparado por Sebastian Thrun, Larry Saul y Bernhard Sholkopf. MIT Press, 2004.

Ecología vegetal

Distribución de las especies perennes en el Huizache

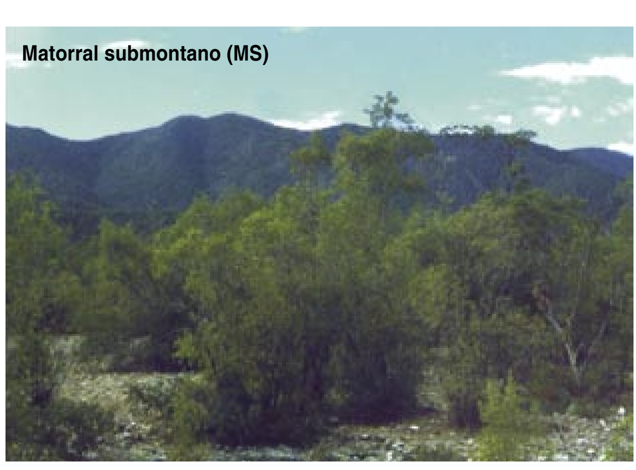
Numerosos estudios han puesto de manifiesto el efecto del medio en la estructura de las comunidades vegetales. Los patrones de distribución de las especies no obedecen a un solo factor, sino a la combinación de muchos (orografía, clima, suelo, etcétera). El Huizache, emplazado en el noreste del estado de San Luis Potosí, constituye una zona prioritaria para la conservación en México. Se trata de un enclave de sumo interés para el desierto Chihuahuense, pues funge como un corredor biológico entre varios de sus sectores. Se considera centro de origen y diversificación de la familia Cactaceae, que presenta un elevado endemismo. Muchas de estas especies se han visto expuestas a una sobreexplotación con fines comerciales o de ornato. Además, el cambio en el uso del suelo ha causado la pérdida de hábitat y la disminución de los tamaños poblacionales de algunas plantas, que ahora se hallan en peligro de extinción.

En el Huizache encontramos cuatro tipos de vegetación: el matorral desértico micrófilo (MDM), que incluye 72 especies; el matorral desértico crasicaule (MDC), con 63; el matorral submontano (MS), con 42 especies; y el pastizal gipsófilo (PG), con 12. Pese a la biodiversidad de estos ecosistemas, el número de especies amenazadas o en peligro de extinción resulta notable: del orden de siete (9,72 %) en el MDM, nueve (14,28 %) en el MDC, siete (16,66 %) en el MS y dos (16,66 %) en el PG.

Debido a la heterogeneidad ambiental, la composición de especies cambia de un tipo de vegetación a otro. Denominamos diversidad beta a la medida de esta diferencia de composición entre dos o más poblaciones locales de especies o entre poblaciones locales y regionales. A medida que aumenta la betadiversidad, mayor es el reemplazo de especies de un ecosistema a otro. El reemplazo de especies entre los cuatro tipos de vegetación presentes en el Huizache es del orden del 54,5 por ciento. El mayor reemplazo se produce entre el MDC y el PG (81 %); el mínimo entre el MDM y el MDC (20 %).









En el Huizache (desierto Chihuahuense, San Luis Potosí) se encuentran cuatro tipos de vegetación: el MDM, propio del fondo de los valles; el MDC, que se distribuye en las laderas de los cerros; el MS; y el PG, que prevalece en afloramientos de yeso.

¿A qué se deben tales reemplazos? La distribución de cada especie, así como la de los grupos de vegetación, depende de la combinación de numerosas variables: clima, latitud, longitud, elevación, exposición e inclinación de las laderas, pedregosidad, profundidad del suelo y tipo de sustrato geológico, entre otros.

En su mayoría, las especies que aquí nos ocupan se hallan restringidas a entornos muy locales. Tal es el caso de las especies del matorral desértico micrófilo: *Agave scabra*, *Opuntia kleineae*, *Hamatocactus crassihamatus* y *Larrea tridentata*, que se distribuyen en enclaves con suelos profundos de origen aluvial, con altos contenidos de potasio y escasa pedregosidad. Lo mismo sucede a *Agave striata* y *Karwinskia humboldtiana*, que medran en el matorral desértico crasicaule, donde predominan las pendientes pronunciadas orientadas al noroeste, los suelos someros y los sustratos sedimentarios. Por su parte, *Helietta parvifolia* y *Neopringlea integrifolia* crecen en el matorral submontano, que presenta pendientes pronunciadas orientadas al noreste, sustratos sedimentarios y suelos someros; en este tipo de vegetación, la distribución de las especies está condicionada en gran medida por el gradiente térmico.

La distribución de las especies perennes en la zona depende de la combinación de varios factores, abióticos y bióticos. De hecho, existen interacciones positivas (nodrizaje, asociaciones micorrícicas) y negativas (competencia, alelopatía) entre las especies que, combinadas con las características del medio, parecen ser responsables del mantenimiento de la diversidad biológica.

La geología ejerce un influjo determinante en la distribución y abundancia de las especies. Los refugios geológicos no sólo ofrecen protección a ciertos individuos (constituyen una limitación física para los herbívoros) sino que también influyen sobre otras variables. Asimismo, la profundidad del suelo, la humedad debida a la escorrentía y la temperatura, entre otros factores, dependen de la pedregosidad.

Las altas concentraciones de calcio y *p*H elevados en el suelo sugieren que existe también un control edáfico sobre la distribución de las especies, que promueve la especialización de hábitats para algunas de ellas. Tal es el caso de las que se distribuyen en el pastizal gipsófilo, en donde abunda el sulfato de calcio (yeso, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$).

FRANCISCO M. HUERTA MARTÍNEZ
y A. MUÑOZ URIAS
Centro Universitario de Ciencias
Biológicas y Agropecuarias.
Universidad de Guadalajara.
Jalisco
E. GARCÍA MOYA
Instituto de Recursos Naturales.
Programa de Botánica.
Colegio de Postgraduados
México

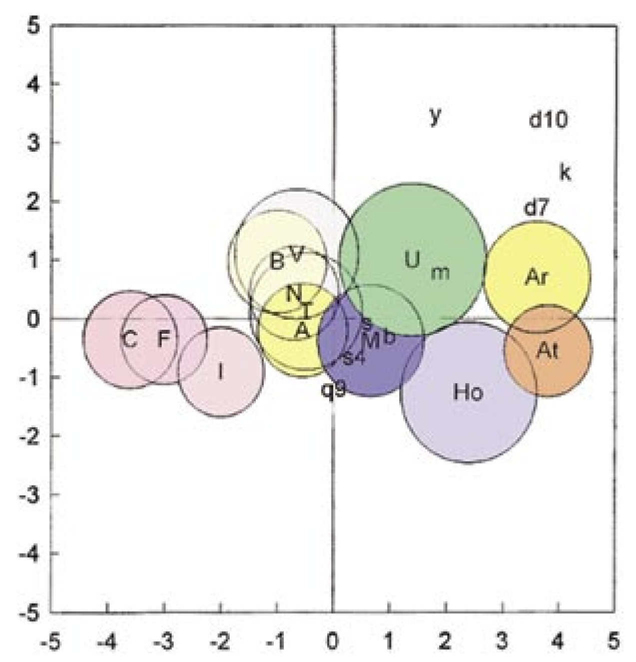
Microestriación dentaria y dieta

Evolución de la alimentación en las poblaciones humanas prehistóricas

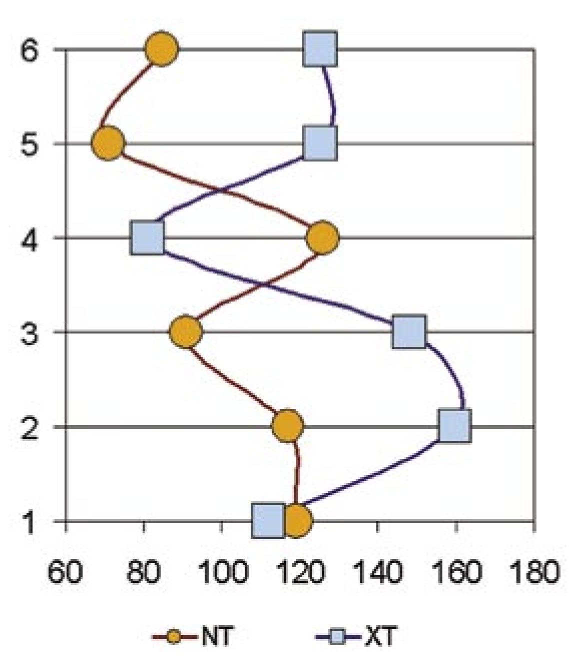
No conocemos la dieta de nuestros antepasados humanos, aunque sabemos que sus técnicas de obtención y preparación del alimento fueron distintas de las nuestras y que explotaron recursos cárnicos de forma eficiente. El estudio de la alimentación de estas poblaciones se basa en el análisis de variables que dependen directamente de los recursos ingeridos, cuya disponibilidad depende a su vez de factores ambientales. La dieta refleja, por tanto, las condiciones del ecosistema en cada momento. El estudio de la dieta de poblaciones prehistóricas mediante el análisis del patrón de microestriación dentaria se basa en la gran dureza del esmalte, que sólo puede ser rayado por partículas abrasivas de sílice presentes en los vegetales como elementos estructurales, o *fitolitos*, que se encuentran en grandes cantidades en las hojas y en los tallos, especialmente de gramíneas. Los fitolitos son resistentes a la cocción y se incorporan a la dieta con el consumo de materia vegetal. Cuanto más abunde este componente en la dieta, mayor será la capacidad abrasiva del alimento durante la masticación. También se encuentran partículas silíceas en las areniscas y sedimentos resultantes de la descomposición de las rocas. Estos abrasivos se pueden incorporar al alimento durante su preparación, como cuando se seca el pescado y la carne al aire o al triturar semillas con morteros de piedra. Así, la capacidad abrasiva del alimento depende tanto de la cantidad de recursos vegetales ingeridos como de las técnicas utilizadas en su preparación, cocinado, trituración o limpieza.

Esta asociación entre dieta y partículas abrasivas permite analizar el efecto que la masticación produce sobre el esmalte. Se trata de un método directo que mide la densidad de estrías producida por el alimento consumido. Con la masticación repetida del bolo alimenticio las estrías, que son microscópicas, se acumulan sobre la superficie del diente y pueden ser contadas merced a la observación al microscopio electrónico (*véase la figura 1*). La densidad de estrías por milímetro cuadrado será mayor en poblaciones vegetarianas, especialmente las agrícolas, que en los cazadores carnívoros. Si el hábitat, el clima o la cultura de cada grupo humano condicionan el consumo de alimento,

1. Patrón de microestriación dentaria de la superficie de esmalte estudiada en un individuo de Atapuerca (AT-588) de la especie *Homo heidelbergensis*. El área estudiada incluye 0,56 mm^2 y la imagen se ha obtenido con un microscopio electrónico de barrido a 100 aumentos. La línea de escala en la parte superior mide 0,5 mm.



2. Comparación de los patrones de microestriación observados en poblaciones humanas prehistóricas con los de poblaciones cazadoras-recolectoras modernas. Cada círculo representa una población. Las poblaciones modernas, que se encuentran a la izquierda del gráfico, tienen una menor densidad de estrías que las más antiguas, a la derecha. Entre éstas, los neandertales (*M en azul y Ho en celeste*) y los modernos (*U en verde*) son los más parecidos a los cazadores-recolectores actuales (*carnívoros en color rosa a la izquierda y de dieta mixta en color más claro en el centro*). Las que mayor densidad de estrías tienen son las poblaciones más antiguas, como las de Arago (*en naranja*) y Atapuerca (*en amarillo pálido*).



3. Fluctuaciones de la densidad de estrías (NT) y su longitud media (XT) en diversos períodos isotópicos del oxígeno —OIS 1, 3 y 5 cálidos— 2, 4 y 6 fríos. Los neandertales, que vivieron durante los períodos 2, 3 y 4, presentan menor densidad de estrías en períodos cálidos, probablemente por el consumo de vegetales y frutos más tiernos y carnosos, que los consumidos en períodos fríos.

el patrón de microestriación dentaria reflejará dichas fluctuaciones. El principal interés de este método consiste en que por primera vez podemos contrastar hipótesis sobre la dieta de los distintos representantes de género *Homo* y sobre sus adaptaciones a condiciones cambiantes del medio.

Los estudios realizados hasta ahora en poblaciones humanas de diversas épocas prehistóricas demuestran que en los últimos 500.000 años de evolución la dieta ha variado enormemente. Los patrones de microestriación de *Homo heidelbergensis* (450.000 años), *Homo neanderthalensis* (180-35.000 años) y *Homo sapiens* (35-10.000 años) muestran que las poblaciones más antiguas, del Pleistoceno Medio, poseedoras de industrias líticas poco elaboradas denominadas de tipo 2 o Achelense, son las que tenían una dieta más abrasiva, mientras que las poblaciones del Pleistoceno Tardío, las más recientes, representadas por los neandertales, con industria de tipo 3 o Musteriense, y los humanos modernos, con industria de tipo 4 o Auriñaciense, presentaban una menor densidad de estrías (*véase la figura 2*). El salto técnico entre la industria de tipo 2 y las de tipo 3 y 4 es muy significativo; habría permitido un mejor aprovechamiento y preparación de los recursos por parte de las poblaciones modernas, que habrían evitado así los agentes abrasivos. Podría explicar el éxito evolutivo de *H. neanderthalensis* respecto a su antecesor *H. heidelbergensis*.

Además, las fluctuaciones que se observan en el patrón de microestriación de los neandertales en los distintos períodos climáticos en que vivieron sugieren que sus poblaciones tenían una gran capacidad de adaptación ecológica. Los períodos climáticos se definen a partir de la variación en la proporción de isótopos estables del oxígeno (el oxígeno 16 y el 18), que depende de la alternancia entre períodos geológicos cálidos y fríos. El análisis de la densidad y longitud de las estrías dentarias de las poblaciones humanas que vivieron entre los períodos isotópicos del oxígeno denominados OIS-2 y OIS-5 muestra claras fluctuaciones en la abrasividad de la dieta en cada período.

Las poblaciones de *H. sapiens* del período frío OIS-2 (12-24.000 años) muestran un promedio de 115 estrías por milímetro cuadrado, mientras que los neandertales que vivieron en los períodos cálido OIS-3 (24-59.000 años), frío OIS-4 (59-74.000 años) y cálido OIS-5 (74-130.000 años) tienen respectivamente 100, 121 y 95 estrías por milímetro cuadrado. Estas fluctuaciones indican que las poblaciones que vivieron en períodos fríos se alimentaron con productos vegetales muy abrasivos, probablemente plantas adaptadas a ambientes fríos, mientras que las poblaciones que vivieron en períodos cálidos habrían comido plantas con brotes tiernos asociadas a cursos de agua y frutos carnosos, además de carne. Aunque es necesario analizar con mayor detalle esta asociación, los datos obtenidos sugieren que los

neandertales habrían sido capaces de adaptarse eficazmente a las condiciones cambiantes del medio, lo que contradice cualquier hipótesis sobre la incapacidad de adaptación biológica o cultural de los neandertales por ser poblaciones supuestamente muy especializadas, adaptadas al frío de forma irreversible. Sin embargo, los neandertales se extinguieron hace 30.000 años, probablemente debido a una mayor eficacia demográfica y cultural de las poblaciones humanas modernas, con las que los neandertales no habrían podido competir.

ALEJANDRO PÉREZ PÉREZ
Sección de Antropología
del Departamento de Biología Animal
Universidad de Barcelona

Ordenadores y algoritmos de visión

Un cibergeólogo para la exploración de Marte

Que podamos encontrar vida en Marte dependerá de la evolución experimentada por este planeta a lo largo de los miles de millones de años de historia del sistema solar. Por eso, uno de los principales objetivos de las misiones consiste en determinar esa evolución. Mientras no se disponga de un modelo evolutivo, no sabremos si se dieron las condiciones adecuadas para que se desarrollara la vida y se conservaran indicios de ella.

El primer paso a dar es la exploración geológica de Marte. Necesitamos conocer la superficie y el subsuelo, cuándo, cómo y por qué se originaron las formas del relieve, y, sobre todo, qué cambios climáticos hubo en el transcurso del tiempo y si permitieron la existencia de vida. Multitud de preguntas cuya respuesta sólo depende de nuestra capacidad para extraer la información necesaria y establecer una hipótesis fiable.

Toda la información sobre la evolución geológica de Marte se encuentra registrada en sus rocas y sedimentos. Para leer ese registro pétreo creado por los procesos geológicos, basta aplicar las mismas técnicas que se emplean en la Tierra. El inconveniente estriba en llevar a Marte al geólogo con su instrumental.

En la Tierra, ante un afloramiento, el experto tarda escasos minutos en hacerse una idea del tipo de roca o sedimento, de las estructuras geológicas presentes (estratos, fallas o pliegues) y de su prelación histórica o cronología. Acotará en seguida las zonas donde extraerá muestras para su investigación posterior en el laboratorio, de acuerdo con el interés que le guíe y el modelo o hipótesis de partida en que se base.

En la actualidad, los robots son incapaces de reproducir el proceso interpretativo de un geólogo. Llevan cámaras para captar y transmitir a la Tierra las imágenes de lo que les rodea, y sensores y aparatos para analizar su entorno y remitirnos los datos obtenidos. A su vez, se hallan a la espera de que se reciba la señal en la Tierra, sea analizada y se les expidan órdenes sobre el paso siguiente a emprender. Resulta evidente que un sistema con cierto grado de autonomía en el análisis e interpretación del entorno ahorraría mucho tiempo y dinero.

Unos investigadores del Centro de Astrobiología y el Instituto Geológico y Minero de España nos hemos propuesto desarrollar un sistema de ordenador personal portátil que realice autónomamente parte del proceso de análisis e interpretación geológica de imágenes. Para ello estamos elaborando un sistema de algoritmos de visión computerizada (AVC), que permitirá analizar las imágenes de un afloramiento rocoso como lo haría un geólogo. Estos AVC se han escrito en un lenguaje



El geólogo lleva puesta la parte portátil o "vestible" del sistema de cibergeólogo, mientras que el especialista en robótica supervisa el funcionamiento del sistema. Durante este ensayo (realizado el 3 de marzo de 2004), la parte robótica del cibergeólogo trabajó de forma autónoma, adquiriendo y procesando las imágenes de un mosaico vertical de la pared del escarpe, cerca de la laguna de El Campillo, en el Parque Regional del Sureste de Madrid. Obsérvese la ausencia de manchas oscuras cerca de la base de la pared. Aparecieron más tarde, después de las lluvias primaverales. El sistema del cibergeólogo las identificó como puntos interesantes durante el segundo ensayo.

de programación gráfica (NEO, de la Universidad de Bielefeld). Se persigue llegar a incorporarlos en robots para la futura exploración de la superficie de Marte.

Nuestro cibergeólogo consta de una cámara de vídeo robotizada conectada a un "ordenador vestible", es decir, un ordenador cuyos componentes se llevan incorporados en la vestimenta. La cámara realiza el barrido de imágenes para su posterior análisis automático por el ordenador, guiado por el geólogo. Ya hemos efectuado algunos ensayos de campo, con resultados satisfactorios. En 2004 instalamos el sistema frente a un escarpe con capas de yeso y arcilla próximo a la Laguna del Campillo, cerca de Rivas Vaciamadrid.

Mediante la realización de sucesivos ensayos, correcciones y mejoras, nos proponemos preparar al sistema del cibergeólogo para que desarrolle de forma autónoma algunas tomas de decisiones. Hasta el momento, ya se ha utilizado el sistema para desarrollar y comprobar el funcionamiento de algoritmos destinados a la adquisición robotizada de mosaicos de imágenes, segmentación de imágenes en tiempo real y determinación, en tiempo real también, de puntos de interés en los mosaicos de imágenes. Comprobada la validez y funcionamiento general, debemos ir mejorando la capacidad de discernir sombras y microtexturas, así como el control, que ha de ser más inteligente, de la lente de zoom de la cámara.

Algo hemos avanzado. En el segundo ensayo de campo, el sistema del cibergeólogo identificó dos pequeñas zonas de color más oscuro en el afloramiento y procedió a estudiarlas. Posteriormente, al aproximarnos al afloramiento (ya sólo como geólogos, sin el ordenador), comprobamos que se trataba de dos zonas con mayor humedad por emanación de agua subterránea. Lo que encierra un interés notable. Si el sistema es capaz de localizar de forma autónoma la presencia de agua en sus primeros ensayos, su potencial para la exploración de Marte no hace más que multiplicarse.

Los primeros resultados de esta investigación ya fueron publicados en 2004 en la revista *International Journal of Astrobiology*. En el curso de este año, el sistema se utilizará en el análisis del interior de un sondeo en los depósitos biogénicos del río Tinto. Al mismo tiempo, estamos trabajando en los diagramas de flujo que definen el proceso lógico que subyace al análisis geológico básico de un afloramiento; queremos convertirlos en algoritmos AVC que pueda utilizar el cibergeólogo. Si nuestros trabajos de investigación llegan a cumplir las expectativas y objetivos que nos hemos propuesto, los futuros exploradores robóticos tendrán una capacidad de toma de decisiones cada vez más parecida a la de un humano.

ENRIQUE DÍAZ MARTÍNEZ
Dirección de Geología y Geofísica
Instituto Geológico y Minero de España, Madrid

PATRICK C. MCGUIRE
y JENS O. ORMÖ
Laboratorio de Geología Planetaria.
Centro de Astrobiología
(INTA/CSIC),
Madrid

CONSTANS

El gen de la floración

Elegir el mejor momento del año para florecer es una decisión que reviste importancia decisiva para el éxito reproductor de la planta. Debe tomarla teniendo en cuenta estímulos externos e internos de diversa índole.

El interés por este proceso se pierde en la noche de los tiempos. Desde que el hombre comenzó a recolectar primero, y cultivar luego, los vegetales de los que se alimentaba, supo qué plantas florecían en cada momento. Incluso las alteró en su propio beneficio. La variedad de arroz cultivada en el sur de España fue "iberizada" en los últimos dos siglos: una especie surasiática que florecía en días cortos, es decir, en otoño-invierno, pasó a florecer en primavera-verano, cuando los días se alargan en la península.

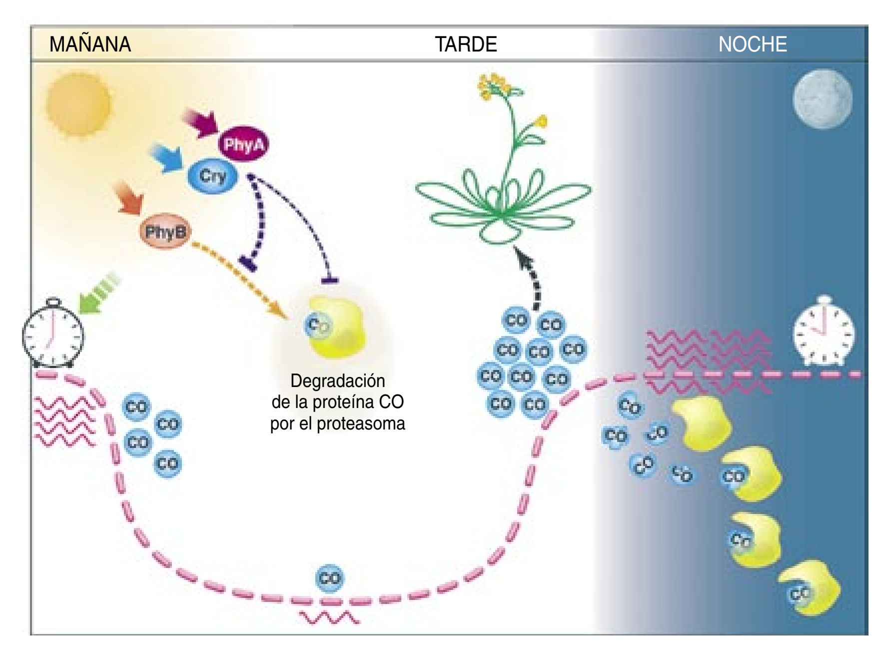
Entre los estímulos externos que determinan la floración, desempeña un papel destacado la temperatura. Sobre todo, en relación a la vernalización, que designa la necesidad de que la planta sufra un período largo de tiempo de bajas temperaturas como requisito indispensable para florecer en la estación siguiente. Lo observamos en numerosas especies de árboles; otro ejemplo son las variedades bianuales de la remolacha, que florecen en la primavera del año siguiente al período de vernalización.

La investigación reciente señala que la respuesta más extendida entre las especies, la más persistente también, a la floración viene inducida por la cantidad y calidad de la luz recibida en cada momento. Este parámetro guarda estrecha relación con el ciclo circadiano, un reloj interno que poseen casi todos los organismos, desde las cianobacterias hasta el hombre; consiste en un sistema interno de medida del tiempo con un período que ronda las 24 horas.

De la familia de la colza y la mostaza, *Arabidopsis thaliana* es una herbácea de ciclo anual, que florece preferentemente en días largos. Merced a su fácil manipulación, ciclo de vida bastante corto y, sobre todo, secuenciación de su genoma, se ha convertido en el modelo experimental habitual de la investigación del desarrollo vegetal.

Los estudios de genética clásica habían mostrado que los mutantes de la floración de *Arabidopsis* remitían a numerosos genes. Cabía, pues, la existencia de diferentes vías de activación o represión de la floración. A uno de tales mutantes se le denominó *constans*; la planta portadora del mismo parecía haber perdido la capacidad de detectar la longitud del día (fotoperíodo) y florecía de manera constante y retrasada, lo mismo en días largos que en días en cortos.

Cuando se clonó el gen *CONSTANS* (*CO*), cuya mutación causaba el retraso floral, se descubrió que codificaba una proteína de características especiales y exclusiva de las plantas. La investigación posterior demostró que la proteína CONSTANS constituía un activador de la transcripción de genes integradores,



Florecer o no florecer. Los niveles de ARNm de CO (*línea magenta discontinua*) se regulan por el reloj circadiano, influenciado (*flecha verde*) por los fotorreceptores. La cantidad de proteína CO (*número de círculos azules*) se debe a los niveles de ARNm y a la estabilidad de la proteína determinada por el proteasoma (*amarillo*). PhyB promueve la degradación de CO, mientras que phyA y Cry favorecen su estabilidad. Durante la noche, aunque el ARNm está a niveles máximos, la cantidad de CO es baja debido a su degradación por el proteasoma. En días largos, phyA y Cry ayudan a mantener altos los niveles de CO; ello provoca la floración. (Las flechas indican una acción estimuladora; las líneas terminadas en barra representan una acción inhibidora).

como *FT* o *SOC1*, cuya presencia en cualquier momento del desarrollo provocaba el paso irreversible del estado vegetativo al reproductivo (floración).

Por otro lado, si se inducía, a través de un proceso de manipulación genética, la expresión del gen *CO* en *Arabidopsis*, la planta se tornaba de nuevo insensible al fotoperíodo, con respuesta inversa a la del mutante: florecía mucho más temprano que la silvestre, tanto en días largos como cortos.

El control de la vía de floración del fotoperíodo parecía tener en *CO* un regulador esencial, papel que afianzamos al descubrir que su expresión dependía del reloj circadiano; éste regulaba la presencia del ARN mensajero (ARNm) de *CO* en razón de la longitud del día (*véase la figura*). De esta manera, la coincidencia del ritmo de la expresión del ARN mensajero de *CO* con la luz vespertina de un día largo inducía la presencia de la proteína y, con ello, la activación de los genes que disparaban la floración.

En una investigación reciente hemos demostrado que no sólo el ritmo circadiano encauza la transcripción del gen, sino que existe, además, una regulación posterior mediada por los fotorreceptores vegetales; esta regulación, si cabe más fina y precisa, determina la presencia y actividad de la proteína CO.

Los fotorreceptores de plantas son proteínas que captan la señal luminosa (fotones) gracias a ciertos pigmentos y, mediante la activación de diversas cascadas de señales, modulan la respuesta de la planta a la luz. Las plantas, organismos sésiles, no pueden escapar de la situación adversa que detectan (por ejemplo, la sombra de una hoja superior) y se ven obligadas a modificar su expresión génica para alterar su estado (en este caso alargar el tallo para alcanzar lugares más soleados).

Los fitocromos y los criptocromos, proteínas fotorreceptoras, reaccionan a luz de diferentes longitudes de onda, desde ultravioleta hasta infrarrojo y así modulan la respuesta a la calidad de luz incidente. Este es el caso de la regulación de la proteína CO: la luz roja excita al fitocromo B, lo que provoca la degradación de CO a través del proteasoma. (Llámase proteosoma a un complejo multiproteico que actúa como un triturador molecular de residuos celulares, al reciclar las proteínas inservibles o que molestan una vez cumplida la misión para la que fueron sintetizadas.)

Por su parte, las luces infrarroja y azul detectadas por el fitocromo A, ayudado ahora por los criptocromos 1 y 2, causan la acumulación nuclear de proteína CO, mientras que la oscuridad determina de nuevo su degradación mediada por el proteasoma. Lo que permite a CO activar los genes de floración es la coincidencia de una señal fotoperiódica modulada por el ritmo circadiano, de acuerdo con la concentración de ARN, y supeditada a una fina modulación de la proteína. Este sistema capacita a la planta para conocer en qué estación del año se encuentra y si las condiciones de luz son adecuadas para florecer, garantizando así que su descendencia germine en el momento óptimo que asegure su supervivencia.

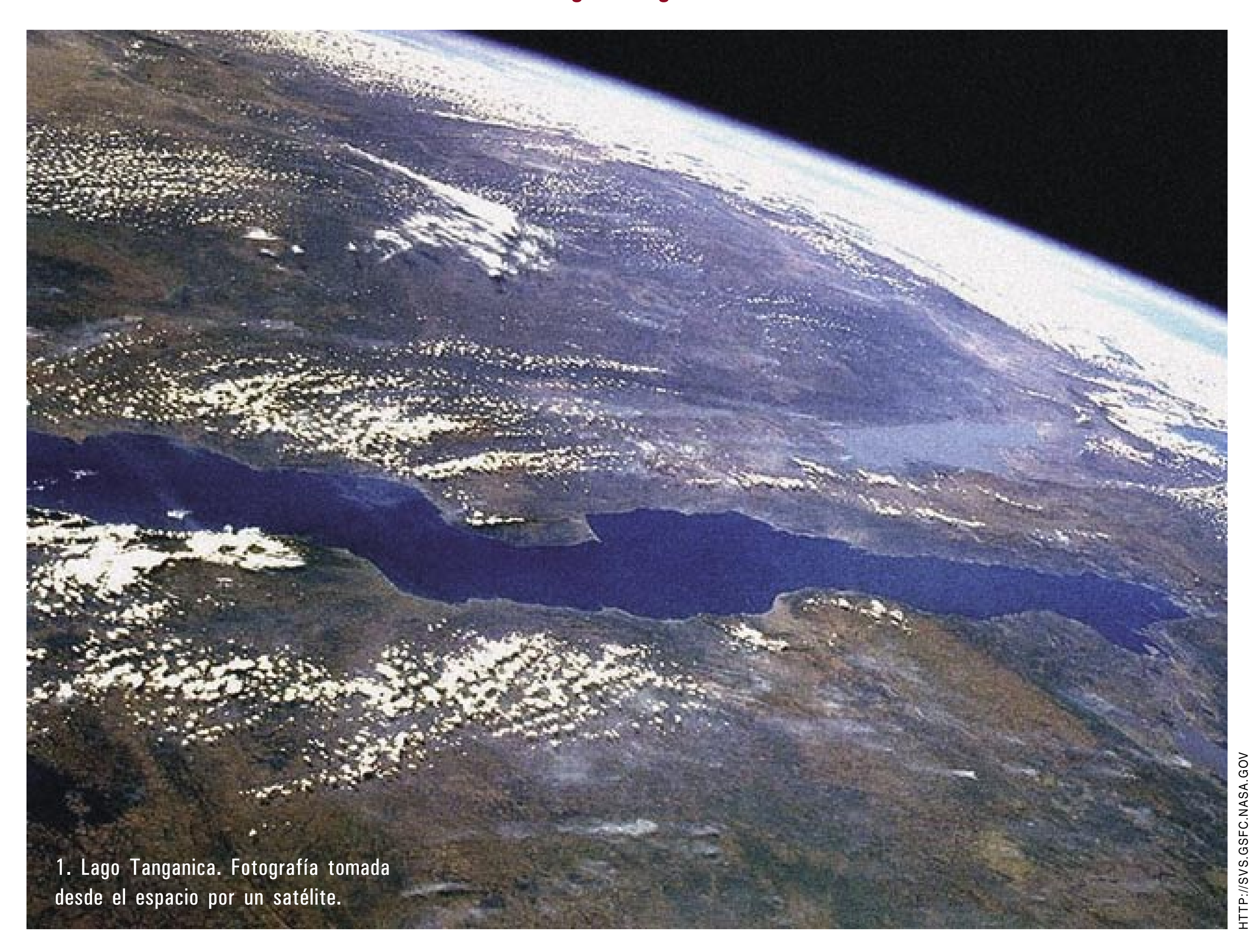
Nuestro estudio aporta, pues, una solución a cuestiones clásicas del desarrollo vegetal, como el efecto que los distintos fotorreceptores y, con ello, las diferentes calidades de luz, ejercen sobre la floración e identifican a CONSTANS como un punto de inflexión para decidir el momento exacto de la floración.

A través de la proteína CO, la planta no sólo detecta la longitud del día, sino que descubre también la calidad de la luz a través de un juego fino de control de los fotorreceptores que regulan la estabilidad de CO y aseguran que sólo se active la floración en el momento apropiado del año. La modulación de estos factores puede tener importantes efectos biotecnológicos. Sólo hay que imaginar la repercusión de la modulación de la floración sobre cultivos tan importantes para nuestro país, y tan parsimoniosos, como el olivo.

FEDERICO VALVERDE
Instituto de Bioquímica Vegetal
y Fotosíntesis
CSIC - Universidad de Sevilla

Fernando Unrein y Hugo Sarmento

El lago Tanganica



1. Lago Tanganica. Fotografía tomada desde el espacio por un satélite.

La palabra Tanganica deriva del verbo *ku tanganya*, que en *swahili* significa *mezclar*. Este "mar de agua dulce" de 650 km de longitud y una anchura media de 50 km tiene una profundidad máxima de 1470 metros, lo que lo convierte en el segundo lago más hondo del mundo. Constituye una de las mayores reservas de agua: contiene el 18 por ciento del agua dulce superficial del planeta, si dejamos aparte los casquetes polares.

La fauna ictícola incluye numerosas especies endémicas de cíclidos, muy apreciados por los acuaristas europeos. Desde el punto de vista alimentario, se considera uno de los lagos más productivos del mundo. Del mismo dependen, directa o indirectamente, unos 10 millones de habitantes.

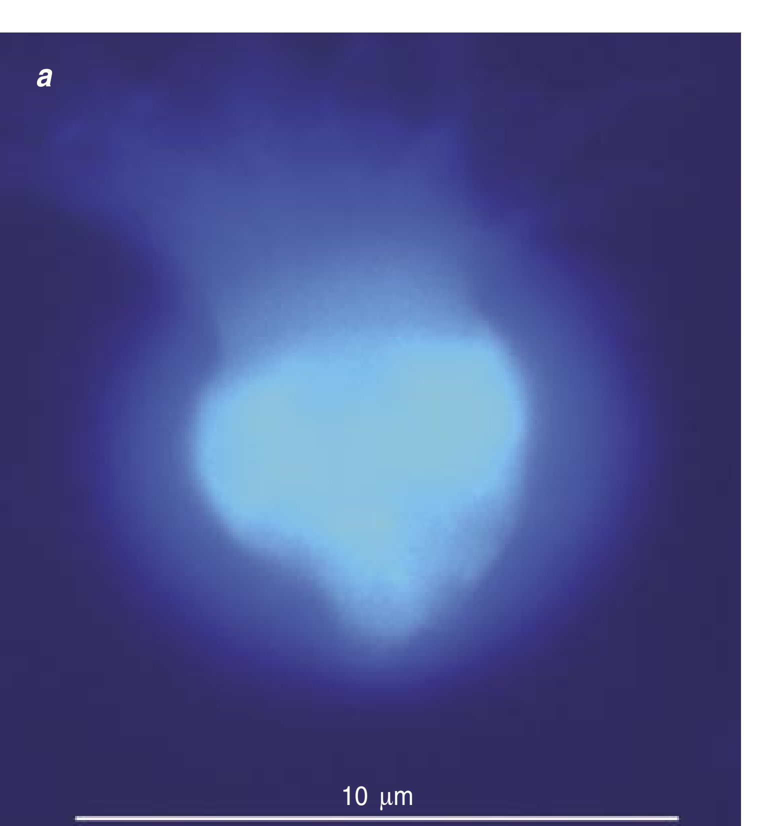
Se trata de un lago oligotrófico, pobre en nutrientes. La concentración de fósforo, esencial para la vida, es muy baja. ¿Cómo se explica entonces su elevada productividad? La respuesta parece encontrarse en las bacterias y las cianobacterias picoplanctónicas (inferiores a dos micras, mil veces menores que un milímetro) que dominan el plancton autotrófico del lago, así como en los pequeños protistas que se alimentan de aquéllas.

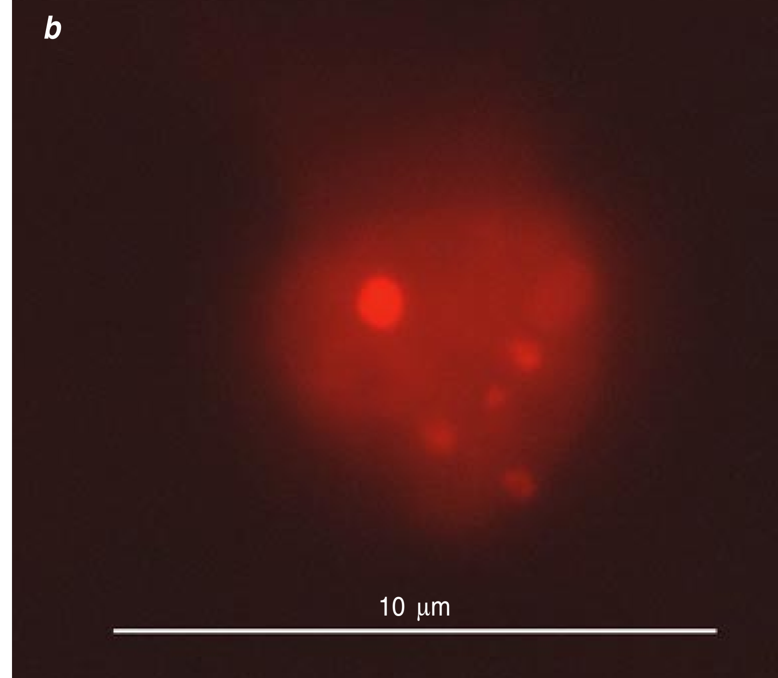
Los microorganismos aprovechan los afloramientos de nutrientes, de periodicidad anual. Durante la época seca, de mayo a septiembre, cuando soplan fuertes vientos del sudeste, la masa superficial de agua, o epilimnion, es empujada hacia el norte y provoca el afloramiento en el extremo meridional: el agua más fría y rica en nutrientes del fondo asciende y fertiliza las capas superficiales —este fenómeno se observa también en numerosas regiones oceánicas—. Combinado con la disponibilidad de luz, el afloramiento favorece el desarrollo de las microalgas, de las bacterias y, por tanto, de todo la trama trófica, incluidos los peces.



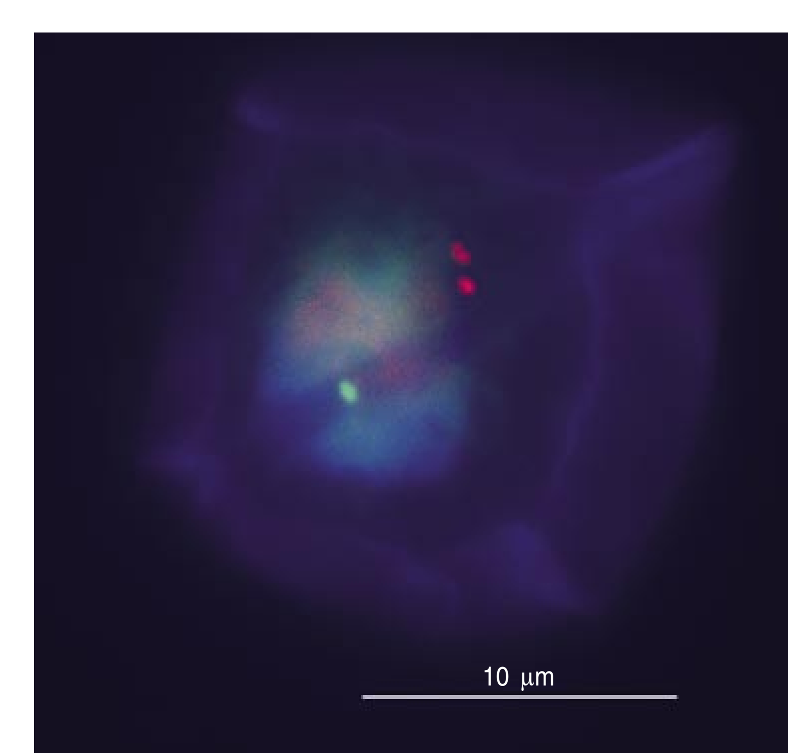
2. *Lates stappersi*, o mgebuka, constituye el principal recurso pesquero. Junto con otros peces, cubre entre el 25 y el 40 por ciento de la demanda de proteína animal de la población de los cuatro países beneficiarios: Tanzania, Zambia, Congo y Burundi.

BRUNO LEPORQ





3. Los ciliados constituyen unos de los principales depredadores del picoplancton. En estas dos microscopías de epifluorescencia se muestra un ejemplar de *Strombidium*: la iluminación con luz ultravioleta (*a*) permite observar el núcleo y el contorno de la célula; la luz verde (*b*) destaca las cianobacterias que consumió (aparecen en rojo debido a las propiedades fluorescentes de la clorofila que contienen).



4. Para estudiar cómo se alimentan los protistas, se tiñen bacterias picoplanctónicas con un colorante fluorescente. Este dinoflagelado ha ingerido una bacteria (*verde*) y dos pequeñas cianobacterias (*rojo*).

Citoquinesis en células eucariotas

En la citoquinesis, etapa final del ciclo celular, se forma una barrera que separará el material genético recién dividido en dos células hijas

Mercedes Pardo

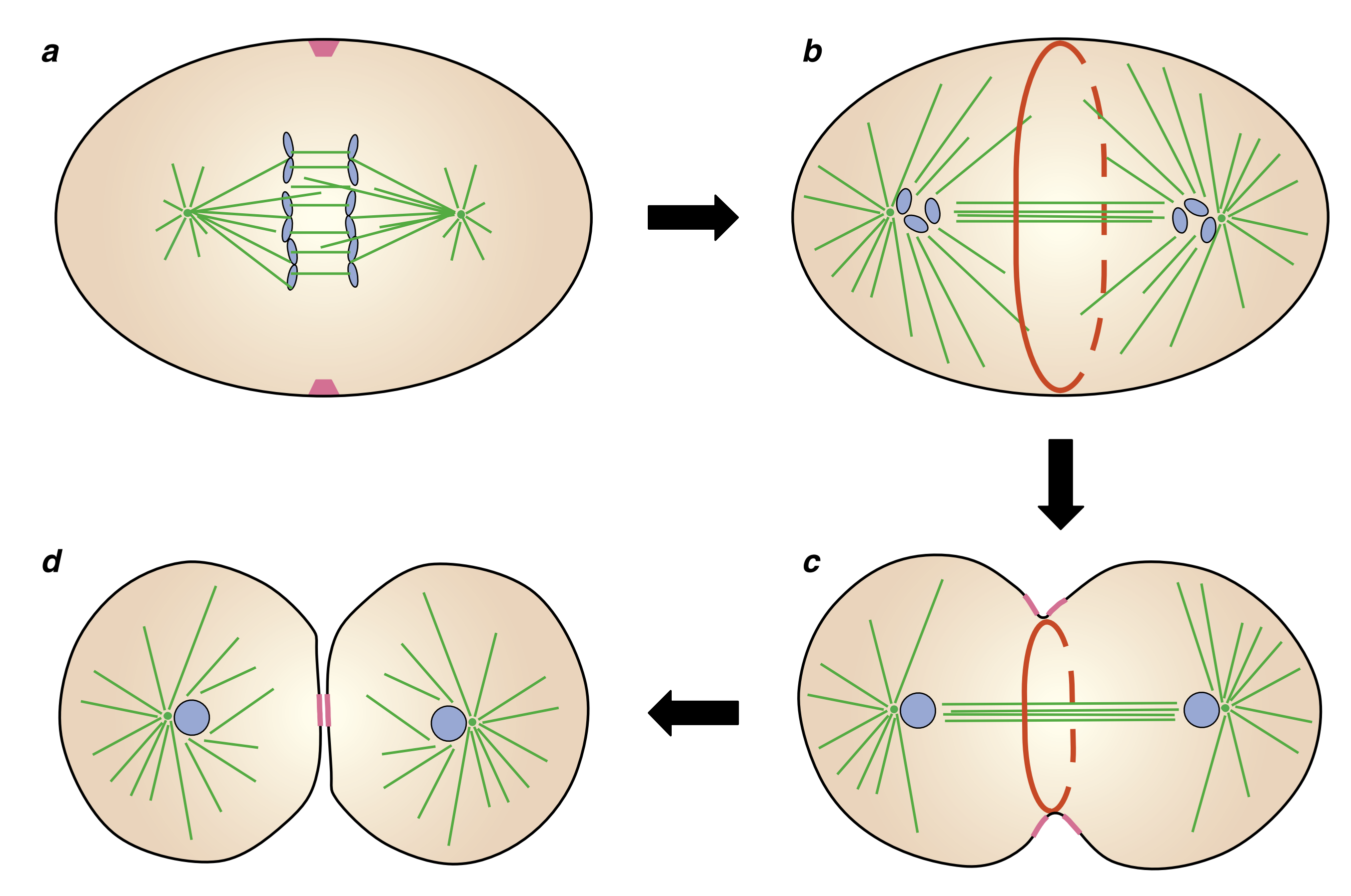
Desde el descubrimiento de la división celular, proceso por el que de una célula progenitora se forman dos células, con el que nació la teoría celular en el siglo XIX, la fascinación por este proceso no ha decaído.

La citoquinesis constituye la etapa final del ciclo celular. Tras hacerlo el material genético, se divide el citoplasma y orgánulos de la célula, que así da origen a dos. La naturaleza ha diseñado una sorprendente nanomaquinaria para llevar a cabo un proceso que va desde el reparto del material genético hasta la separación física de una célula en dos, en sutil coordinación para asegurar que cada célula hija recibe un conjunto completo de cromosomas y orgánulos celulares.

Los primeros estudios sobre citoquinesis se realizaron con embriones de erizos de mar, de fácil manejo. Predominaba el enfoque morfológico. Así se identificaron las estructuras implicadas en la división celular. Con el avance de la genética, los modelos experimentales se ampliaron y permitieron esclarecer los procesos y mecanismos moleculares involucrados.

Los experimentos realizados en levaduras, la mosca del vinagre (*Drosophila melanogaster*), el gusano *Caenorhabditis elegans* y células de mamíferos en cultivo han aumentado nuestro conocimiento de la citoquinesis. Se ha llegado al descubrimiento de un modelo común, si bien se admite que cada tipo celular posee sus particularidades. Aquí nos ceñiremos a la citoquinesis en células eucariotas; los procariotas emplean un sistema diferente.

La citoquinesis ocurre inmediatamente después de la mitosis o segregación del material genético. Procede a través de la sucesión ordenada de varias etapas: elección del plano de división, ensamblaje de la maquinaria de división, invaginación de la membrana plasmática y separación celular.



1. PRINCIPALES ETAPAS DE LA CITOQUINESIS. Antes o durante la mitosis, se selecciona el plano de división (*a*). Allí se ensambla la maquinaria de división, que en la mayoría de los eucariotas, vegetales excluidos, es un anillo contráctil formado por las proteínas actina y miosina (*b*). El anillo se contrae y provoca la invaginación de la membrana plasmática, a la vez que se produce la inserción de nueva membrana (*rosa*) para aumentar la superficie celular (*c*). Por último se produce la separación celular, que requiere de la inserción de nueva membrana (*d*). El material genético se muestra en azul, el anillo contráctil en rojo y los microtúbulos en verde.

MERCEDES PARDO

En células animales, protozoos y hongos unicelulares el componente fundamental de la maquinaria de división es un anillo contráctil formado por actina y miosina. Las plantas carecen de este anillo y utilizan el fragmoplasto; además, no invaginan la membrana plasmática, sino que construyen la pared de separación entre las células hijas de forma centrífuga, desde el centro celular hacia el exterior. Los hongos, aislados del medio exterior por una pared celular rígida que los rodea, sintetizan un septo de separación entre las dos células hijas, pero lo hacen de forma centrípeta y simultánea con la invaginación de la membrana plasmática.

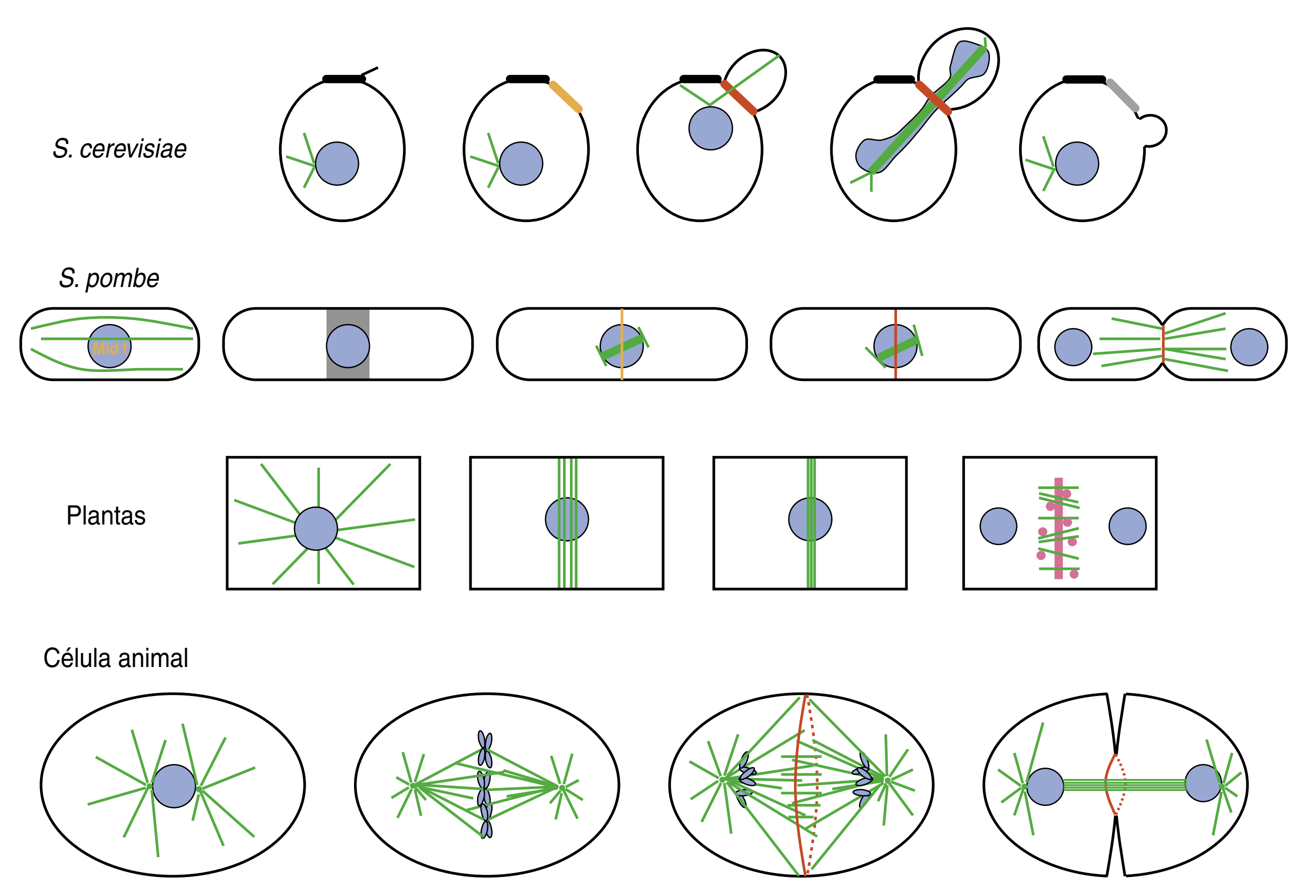
Elección del plano de división

La coordinación espacial de la citoquinesis con la mitosis es crucial para el mantenimiento de la estabilidad genética, es decir, para que cada célula reciba el conjunto exacto de cromosomas que le corresponde. La inestabilidad genómica puede provocar la muerte celular, está asociada con patologías del desarrollo y constituye una de las notas características de la mayoría de los cánceres humanos.

Para que cada célula hija reciba una copia completa del material genético, el plano de división ha de ser perpendicular al eje de la segregación de los cromosomas. Durante la mitosis, corresponde al huso mitótico la segregación del material genético. Sépase, además, que el mecanismo utilizado para determinar el plano de división es el apartado de la citoquinesis que ha experimentado más cambios en el curso evolutivo de los eucariotas. Las células animales recurren a un mecanismo basado en la posición del huso mitótico, mientras que las plantas y las levaduras —hongos unicelulares— lo hacen de forma independiente del huso.

La levadura de la cerveza (*Saccharomyces cerevisiae*) se divide por gemación, es decir, mediante la formación de una yema que brota de la célula madre. El plano de división es el cuello entre las células madre e hija; depende, por tanto, del lugar donde emerge la yema. El sitio de gemación se selecciona en estadios tempranos del ciclo celular, antes de que se forme el huso mitótico; guarda relación con el sitio por donde se dividió la célula progenitora en el ciclo celular anterior.

Según la cepa de levadura, la nueva yema aparece adyacente al sitio de la gemación anterior o en el polo opuesto. La determinación del sitio de gemación precisa una serie de proteínas que constituyen "puntos de referencia". La localización de éstas depende del anillo de septinas. Las septinas son proteínas con dominio GTPasa que se asocian en filamentos; se ensamblan, en una estructura anular, en la cara interna de la su-



2. MECANISMOS DE POSICION del plano de división en organismos eucariotas. En la levadura *S. cerevisiae*, la nueva yema surge al lado de la cicatriz de la anterior. La maquinaria de división se ensambla en este lugar, predeterminado por marcas o señales (*naranja*) depositadas en las primeras fases del ciclo celular. En la levadura de fisión (*S. pombe*) y en células vegetales la posición del núcleo antes de la mitosis determina el plano de división. En *S. pombe* la proteína Mid1 (*naranja*) transmite la posición del núcleo a la envoltura celular para el posterior ensamblaje del anillo de actomiosina. En las plantas, los microtúbulos forman una banda que deja marcada la envoltura celular en el plano de división. El tabique de división se erige mediante la fusión de vesículas membranosas (*puntos rosas*); crece hasta contactar con la superficie celular. En células animales los microtúbulos del huso mitótico determinan la posición del plano de división mediante interacciones con la superficie celular. Se ha representado el ADN en azul, el anillo contráctil de actomiosina en rojo y los microtúbulos en verde.

MERCEDES PARDO

perficie celular. Este anillo marca el sitio de la futura gemación en la fase G1 del ciclo, antes de la mitosis; luego, permanecerá en el cuello entre madre e hija durante la mayor parte del ciclo celular. Al final del ciclo, el anillo de septinas organiza a las proteínas de referencia. Estas atraen y organizan la maquinaria necesaria para el crecimiento de la nueva yema.

Además de actuar en la selección del sitio de gemación, las septinas participan de manera directa en la citoquinesis: intervienen en el ensamblaje del anillo contráctil y en la formación del septo.

Las septinas se identificaron en *S. cerevisiae* mediante el análisis de mutantes que se caracterizan por presentar defectos en la septación (de ahí su nombre). Posteriormente, se descubrieron en la mayoría de los grupos eucariotas, excepto en plantas. En células animales, las septinas se colocan en el surco de división y se sospecha que también desempeñan alguna función en la citoquinesis.

La levadura de fisión (*Schizosaccharomyces pombe*) se divide por fisión binaria; de ahí su nombre. Para elegir el plano de división, emplea un mecanismo distinto, que no está basado en marcas de referencia previas. Con forma de bastón alargado, *S. pombe* presenta el plano de división determinado por la posición del núcleo justo antes de la mitosis, situado en el centro de la célula.

Ahora bien, ¿cómo señala el núcleo dónde ha de colocarse la maquinaria de división? El mecanismo molecular responsable se descifró mediante mutantes incapaces de colocar la maquinaria de división en el centro de la célula; las levaduras mostraban así una septación desplazada. A la proteína Mid1, que es defectuosa en uno de estos mutantes, le corresponde señalar el sitio de división.

Cuando la célula no está dividiéndose, Mid1 se halla en el núcleo; forma también una banda en la superficie celular en torno al núcleo. Pero al comienzo de la mitosis, se produce la fosforilación de Mid1 por la quinasa Polo, un importante regulador del ciclo celular que se activa justo antes de la mitosis. La fosforilación provoca que la banda se condense y forme un anillo fino en

torno al núcleo. Sobre este anillo de Mid1 se ensambla entonces el anillo contráctil de actina y miosina. Mid1 permanece en el anillo contráctil hasta que comienza la septación.

En células que carecen de Mid1, el anillo contráctil se ensambla, pero lo hace en lugares erróneos, dando lugar en ocasiones a células binucleadas y a células pequeñas carentes de material genético.

Células animales y vegetales

Existe una proteína semejante a Mid1 en células animales, la anillina, que también forma parte del anillo contráctil. Mas, a diferencia de Mid1, la anillina es indispensable para la citoquinesis. Se une a filamentos de actina y los agrupa en haces. La anillina podría funcionar como un adaptador entre los haces y las septinas, pues se une también a estas últimas, acoplando el anillo contráctil a la membrana plasmática.

En la célula vegetal el núcleo interfásico señala el plano de división. El primer paso en la elección del sitio de división es la formación del fragmosoma, un conjunto de microtúbulos que se acumulan transversalmente en el citoplasma en las zonas de menor distancia entre el núcleo y la superficie celular. (Los microtúbulos, polímeros de tubulina, forman parte del citoesqueleto celular.) Adyacente a la membrana, la acumulación de microtúbulos junto con actina crea un anillo llamado "banda de pre-profase", que determina dónde se establecerá la pared de separación entre las células hijas. La banda de pre-profase desaparece antes de iniciarse la metafase, o fase de alineación de los cromosomas, no sin dejar marcada la envoltura celular. Esta señal guía la fusión de la nueva pared de separación con la membrana plasmática.

Dos modelos en células animales

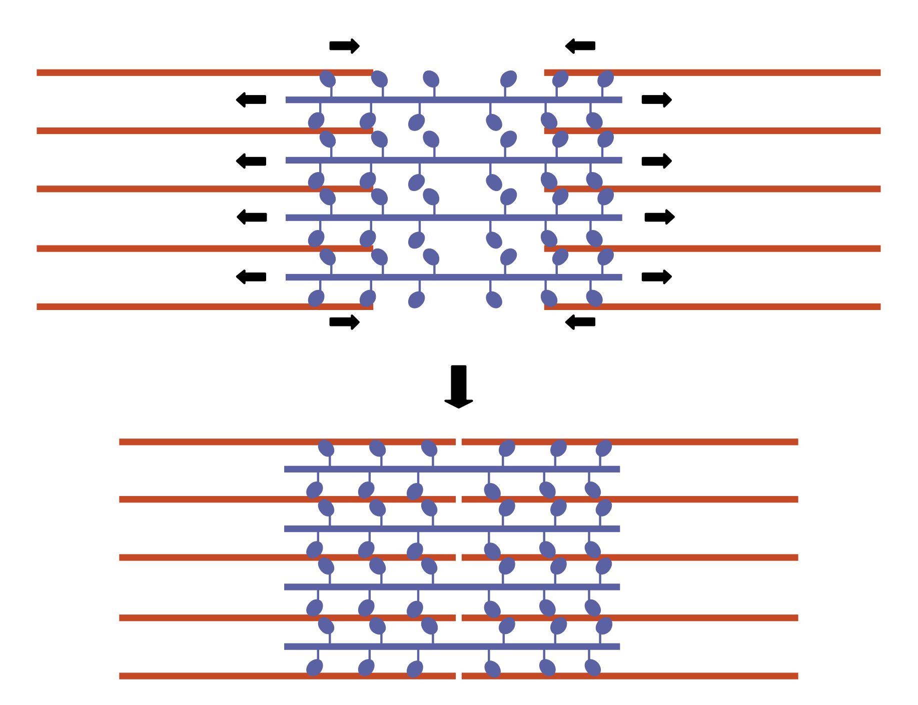
Según demostró Rappaport, el plano de división de la célula animal queda determinado por el huso mitótico. Se desconocen el mecanismo molecular y los componentes del huso responsables de la ubicación de la maquinaria de división, aunque parece que cada sistema posee su mecanismo peculiar.

Los dos modelos clásicos atribuyen el papel principal en la selección del sitio de división a los microtúbulos astrales o a los microtúbulos de la zona central del huso, respectivamente. Denomínanse astrales los microtúbulos no comprendidos en el huso. De acuerdo con el primer modelo, basado en embriones de invertebrados marinos, los microtúbulos astrales de ambos polos, en estadios tempranos de la anafase, o fase de separación de los cromosomas, interaccionan con la envoltura celular y determinan la posición del plano de división. En embriones de invertebrados con dos husos mitóticos, la presencia de dos conjuntos de microtúbulos astrales de husos puede inducir la formación del surco de división entre ellos. Además, aunque mediara un obstáculo entre huso y envoltura, no se impediría la formación del surco.

El segundo modelo se apoya en resultados obtenidos en cultivos celulares. En las células sólo se desarrolla un surco de división donde hay huso mitótico o un haz de microtúbulos; si se interpone un obstáculo entre el huso y la superficie celular, no se produce la división. Por eso se propuso que la zona central del huso mitótico era la responsable de la selección del sitio de división.

La investigación reciente apunta hacia una conciliación de ambos modelos. En experimentos de micromanipulación con espermatocitos de saltamontes se ha comprobado que los microtúbulos astrales inducen la formación del surco de división. Paradójicamente, un huso mitótico al cual se eliminan los microtúbulos astrales posee también idéntica capacidad. Ahora bien, cuando los microtúbulos astrales promueven la invaginación de la membrana, sufren reorganizaciones y se agrupan en haces compactos, similares a la zona central del huso mitótico. Con otras palabras, los haces de microtúbulos podrían ser, en general, los componentes del huso mitótico necesarios para inducir la formación del surco de división.

De ello no habría que deducir que sean los microtúbulos los responsables directos. Para el desarrollo correcto de la citoquinesis se requiere la presencia de numerosas proteínas motoras y factores reguladores alojados en ellos. Canman y sus colaboradores han descrito la existencia, en células de mamífero, de una subpoblación de microtúbulos del huso mitótico que se hallan asociados a cromosomas y establecen interaccio-



MERCEDES PARDO

3. DESLIZAMIENTO DE FILAMENTOS de actina y miosina, similar al que ocurre en un músculo. Resulta determinante para la contracción del anillo citoquinético. Las moléculas de miosina (*azul*) son proteínas motoras que "caminan" sobre los filamentos de actina (*rojo*), a la vez que tiran de ellos, consiguiendo así la contracción de los filamentos.

nes estables con la superficie en el ecuador celular; podrían estimular la contractilidad de esta zona.

De acuerdo con el modelo de Canman, los cromosomas desempeñarían una función directa en la ubicación del plano de división a través de los microtúbulos; contribuirían a su estabilización mediante el transporte de factores estabilizadores desde los centrómeros.

Ensamblaje de la maquinaria y división

La estructura encargada de llevar a cabo la partición del citoplasma en animales y hongos es un anillo contráctil que se ensambla en la cara interna de la superficie celular, unido a la membrana plasmática. A través de su movimiento contráctil, dirige la invaginación de la membrana plasmática. Pese a que los hongos poseen una pared celular rígida que ciñe a la membrana plasmática, se sirven también de un anillo contráctil para llevar a cabo la citoquinesis.

Los componentes esenciales del anillo son filamentos de actina y miosina. Las moléculas de actina se ensamblan en un polímero, o filamento. La miosina, proteína con actividad motora, "camina" sobre los filamentos de actina aprovechando la energía producida por su actividad ATPasa. Se atribuye a la miosina la fuerza de contracción del anillo. Si se inhibe la actividad ATPasa de la miosina durante la división celular, el anillo no se contrae. Pero no acaba de comprenderse el mecanismo de contracción; se requiere, cierto, el deslizamiento de los filamentos de miosina y actina. Sin embargo, en varios tipos de células los filamentos de actina y miosina no se hallan longitudinalmente alineados en el anillo contráctil; es decir, no podemos simplemente asimilar el proceso a una contracción muscular.

Además de actina y miosina, el anillo contráctil contiene otros componentes necesarios para su formación y mantenimiento. Tales componentes han perdurado a lo largo de la filogenia. La ausencia de cualquiera de ellos provoca defectos en la organización del anillo y el fracaso de la citoquinesis; aparecen entonces células binucleadas. Varios componentes del anillo son proteínas estructurales, que, a la manera de un andamio, permiten el anclaje de otras moléculas.

El anillo contráctil, una estructura dinámica, se halla en permanente renovación. Encontramos, pues, entre sus componentes, proteínas implicadas en la polimerización o despolimerización de filamentos de la actina; por ejemplo, las forminas. Estas proteínas poseen dominios FH1 y FH2, mediante los que se unen a profilina —otro componente del anillo contráctil que se une a monómeros de actina y los coloca en el extremo en crecimiento del filamento— y participan en la formación de filamentos de actina. Para la renovación de éstos, y reforzar el dinamismo del anillo, se requiere la intervención de cofilina.

Corresponde a la familia de proteínas PCH, al menos en la levadura *S. pombe*, la presumible función de iniciar la construcción del anillo contráctil, pues resulta imprescindible para asociar a éste una formina y el complejo Arp2/3, ambos responsables de la polimerización de filamentos de actina.

Otros componentes participan en la regulación de la formación y función del anillo. La proteína IQGAP posee dominios de unión directa a actina, calmodulina y GTPasas pequeñas; podría, quizás, establecer la conexión entre la polimerización de actina y las rutas de señalización reguladoras del ensamblaje del anillo. La GTPasa Rho cumple, en el anillo, una función moduladora de proteínas que afectan a la dinámica de la actina (como cofilina, profilina y formina) y moduladora también de otras comprometidas con la regulación de la actividad de la miosina.

Hemos hablado antes de las septinas, que han persistido a lo largo de la evolución. En la levadura *S. cerevisiae*, además de marcar el sitio de división, ejercen una actividad directa en la citoquinesis, donde parecen operar como andamios para el anclaje de proteínas necesarias para el ensamblaje del anillo (como la miosina) y para la síntesis de quitina, parte del material que constituye el septo. Se sospecha que impiden la contracción del anillo hasta el momento adecuado. Sin embargo, en la levadura de fisión las septinas no parecen necesarias para el ensamblaje o localización del anillo contráctil, aunque sí intervengan, cabe presumir, en la separación celular. En células de mamífero, los filamentos de septinas se asocian con los de actina. Algunas septinas de mamíferos aparecen fusionadas a un protooncogén en casos de leucemia mieloide, lo que sugiere una posible implicación en la tumorigénesis, mientras que otra septina es un supresor de tumores.

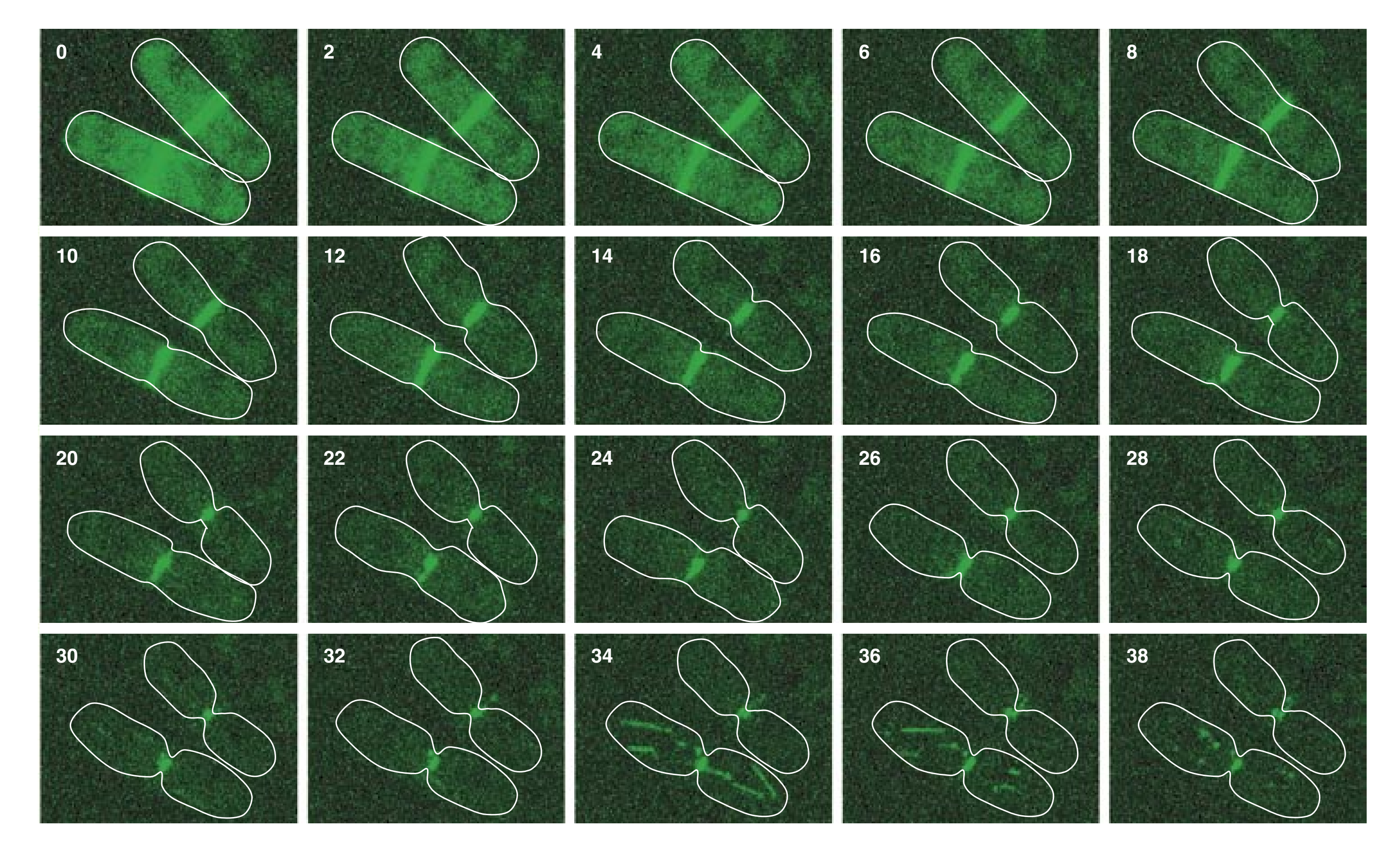
Variación del ensamblaje

La secuencia temporal del ensamblaje del anillo contráctil varía según los organismos. Si en células animales el anillo se forma al final de la anafase, en *S. cerevisiae,* en cambio, se genera de un modo más escalonado, que se prolonga a lo largo del ciclo celular. Merced a esa peculiaridad, esta levadura se ha convertido en modelo ideal para el estudio de la secuencia temporal del ensamblaje y para determinar la interdependencia entre componentes.

En la levadura de la cerveza, el proceso comienza con el ensamblaje del anillo de septinas en la superficie celular, antes de la emergencia de la yema. Luego, la miosina se instala sobre el anillo; a continuación, en anafase, la actina se incorpora al anillo antes de la contracción. El proceso difiere algo en *S. pombe*, levadura en la que el anillo de actina y miosina se forma al principio de la mitosis; la contracción acontece al final de la anafase.

No se conoce bien el mecanismo del ensamblaje del anillo. En *S. pombe* se produce, primero, una acumulación de cables de actina y miosina y de otros componentes del anillo en el ecuador celular; poco a poco, estos componentes se condensan y crean un anillo definido. En células de mamífero la acumulación de actina en el ecuador celular podría deberse a un flujo cortical de actina polimerizada desde otras zonas de la célula.

En la célula animal la formación del anillo contráctil procede casi simultánea con la elección del plano de división. Cuando el anillo se contrae tirando de la membrana plasmática hacia el centro celular, se encuentra con la zona central del huso mitótico; esta estructura microtubular se ha constituido por la agrupación en haces de los microtúbulos que no están unidos a



4. **SECUENCIA DE VIDEOMICROSCOPIA** de fluorescencia de la citoquinesis en la levadura *S. pombe*. Estas células llevan insertada en su genoma una copia de la miosina unida a proteína verde fluorescente; ello nos permite visualizar el anillo contráctil. Nótese la contracción del anillo y la división final de la célula en dos. Se indica el tiempo transcurrido entre cada imagen en minutos. Las formas en blanco definen el perímetro de las células.

MERCEDES PARDO

cromosomas. En los últimos estadios de la citoquinesis, tales haces de microtúbulos se compactan para dar origen al cuerpo medio.

La zona central del huso y el cuerpo medio resultan decisivos para que la citoquinesis se lleve a término. Varias proteínas alojadas en los microtúbulos de la zona central del huso mitótico dirigen la formación del surco de división y son necesarias para la culminación de la citoquinesis; su ausencia o mutación provoca fallos en el proceso. Podemos agrupar dichas proteínas en dos categorías: "pasajeros cromosómicos" y proteínas motoras de microtúbulos.

Pasajeros cromosómicos

Integran el primer grupo un complejo proteico constituido por las proteínas INCENP, survivina, Aurora B y CSC-1. Recientemente se ha identificado al factor de intercambio RCC1 como otro pasajero cromosómico, aunque no se ha determinado si forma parte del complejo anterior y si interviene también en la citoquinesis.

La expresión "pasajeros cromosómicos" evoca su distribución celular: se trata de proteínas asociadas a los cromosomas al principio de la mitosis, concentrándose en los centrómeros en metafase. En anafase avanzan desde los centrómeros hasta los microtúbulos de la zona media del huso mitótico; luego se trasladan a la superficie ecuatorial de la célula. La presencia ecuatorial de los pasajeros cromosómicos resulta obligada para la citoquinesis.

Según parece, el componente activo del complejo proteico es la quinasa Aurora B. Las proteínas INCENP y survivina son necesarias para localizar correctamente dicha enzima, amén de contribuir a su activación. De hecho, INCENP es uno de los componentes más precoces del plano de división; aparece incluso antes que la miosina. Se exige la actividad quinasa de Aurora B para la organización del cuerpo medio.

Cuando falta o está defectuoso alguno de los componentes del complejo, las células comienzan a invaginar el surco de división; después, éste retrocede, dando lugar a células multinucleadas. La regresión del surco de división se debe a un fallo en la organización de los microtúbulos de la zona media del huso.

Los pasajeros cromosómicos participan, además, en la condensación del ADN y la segregación de los cromosomas; podrían, pues, constituir el nexo de unión en la regulación coordinada de mitosis y citoquinesis. El acoplar la segregación de los cromosomas a la formación de la zona media del huso garantiza que la citoquinesis esté coordinada con el reparto del material genético. Muchas líneas celulares tumorales contienen niveles de Aurora B más elevados de lo normal, indicio de su

posible intervención en procesos de tumorigénesis.

Proteínas motoras

El grupo de las proteínas motoras lo integran dos familias de quinesinas: MKLP1 y KLP3A. Ambas se alojan en la zona central del huso mitótico. Su presencia resulta imprescindible para la constitución de la zona central y la terminación de la citoquinesis.

La familia MKLP1 se une a una GAP (proteína activadora de GTPasa) de la familia Rho (HsCYK-4). El complejo resultante, la centralspindlina, que ha perdurado en la escala evolutiva, promueve la agrupación de microtúbulos en haces *in vitro*. Si falta o ha sufrido una mutación cualquiera de los dos componentes, se desorganiza la zona central del huso mitótico.

Existe una relación funcional entre el complejo centralspindlina y el complejo Aurora B-survivina-INCENP. La ausencia de Aurora B o de INCENP provoca un defecto en la localización de MKLP1. Además, se ha observado que en células humanas Aurora B fosforila a CYK-4 y modula su especificidad, haciéndola actuar sobre RhoA. La proteína RhoA podría ser inactivada en los estadios finales de la citoquinesis, para dar término a este proceso.

Hemos dicho que la quinasa Polo, presente en los microtúbulos de la zona central del huso, desempeña un papel crucial en la citoquinesis. Polo fosforila a la quinesina MKLP1, y asegura su correcta localización.

En resumen, dos quinasas, Aurora B y Polo, son esenciales para asegurar la correcta organización de los microtúbulos de la zona media del huso mitótico y la culminación de la citoquinesis. Se trata de quinasas capacitadas, quizá, para fosforilar substratos y así promover el ensamblaje de la zona media del huso mediante uniones entre microtúbulos o el transporte de factores estabilizadores de los mismos. Podrían también originar señales en la red ecuatorial de actomiosina o controlar la dinámica de las membranas, con el fin de asegurar que esta fase de la citoquinesis llega a buen puerto. Entra dentro de lo posible que las quinesinas se requieran para estabilizar los microtúbulos de la zona central del huso o incluso que se encarguen del transporte de componentes necesarios para el ensamblaje del anillo hasta el plano ecuatorial de la célula.

Interdependencias

En los últimos años se han aportado pruebas de la relación de interdependencia, en la célula animal, entre los microtúbulos de la zona media del huso mitótico y el anillo contráctil. Cuando una de estas estructuras sufre una alteración, por mutación o agresión química, se resiente también la otra, con la desorganización consiguiente de la maquinaria de división y fracaso de la citoquinesis. Este fenómeno se ha observado principalmente en *Drosophila* y en células de mamífero en cultivo.

Las mutaciones en componentes del anillo contráctil que provocan la desorganización del mismo ocasionan también defectos en la zona central del huso. Si se despolimerizan químicamente los microtúbulos durante estas fases, o se altera la estructura mediante mutaciones en las quinesinas antes mencionadas, se desorganizan los filamentos de actina del anillo, llegándose incluso a la regresión del surco de división.

Así pues, parece que los microtúbulos de la zona central del huso mitótico desempeñan una función en la estabilización del anillo contráctil durante la anafase y la telofase. Acontece, asimismo, el proceso inverso. En la levadura de fisión, hemos observado una interdependencia similar de las estructuras equivalentes. El anillo de actina se requiere para que, al final de la mitosis, se formen estructuras microtubulares necesarias para la citoquinesis. Y si se eliminan estas estructuras mediante tratamiento con agentes despolimerizantes de microtúbulos se desplaza el anillo contráctil hacia uno de los extremos celulares, fenómeno que desemboca en inestabilidad genética cuando se divide la célula.

Fragmoplasto

Las plantas poseen un mecanismo diferente para llevar a cabo la citoquinesis. No utilizan el anillo contráctil. Para construir el tabique de separación entre las dos células hijas, desde el centro de la célula hacia el exterior, se sirven de los microtúbulos y de la fusión de vesículas de secreción. La estructura responsable de la división celular en los vegetales se denomina fragmoplasto.

Aparece al final de la anafase. Consta de microtúbulos y filamentos de actina. Los microtúbulos del fragmoplasto transportan vesículas derivadas del aparato de Golgi, que contienen los materiales para la construcción de la placa de separación (constituida por nueva membrana y pared celular) entre las futuras células hijas. El ensamblaje de la placa de separación se produce mediante la fusión de vesículas entre sí y con la placa en crecimiento, desde el centro celular hacia el exterior, hasta contactar con la pared de la célula parental.

Sin embargo, ciertos descubrimientos recientes en células animales y levaduras apuntan a que el mecanismo utilizado por los vegetales quizá no resulte, a la postre, tan diferente. La fusión de vesículas para la adición de membrana se considera ahora un elemento común de la citoquinesis en todos los eucariotas. Esta hipótesis viene avalada por la observación de que se exige la intervención de varias proteínas implicadas en la secreción, lo mismo en vegetales que en células animales, para la citoquinesis. Además, el transporte de estas vesículas se perfila como la función universal de los microtúbulos de la zona central del huso mitótico.

Membranas y sintaxina

Para aumentar la superficie membranosa durante la citoquinesis, debe llegar nueva membrana al plano de división, aportada, según diversos indicios, por vesículas procedentes del aparato de Golgi, y que acabarían por fusionarse con la membrana plasmática en el surco de división.

Los receptores SNARE son un conjunto de proteínas persistentes en el curso evolutivo que median la fusión de membranas en varias rutas de tráfico intracelular. Existen dos tipos de SNARE: *t* y *v*. Las *t*-SNARE se localizan en la membrana diana (*t*, de "target"), o receptora, y las *v*-SNARE en la membrana de las vesículas (*v*, de "vesicle"). La unión de *t*-SNARE y *v*-SNARE media la fusión de las vesículas a la membrana receptora. Se cree que la fusión en cada paso de la ruta secretora viene

posibilitada por una pareja específica de SNAREs.

La sintaxina es una *t*-SNARE. El descubrimiento de que la mutación de la sintaxina KNOLLE en plantas provoca un fallo en la citoquinesis fue la primera prueba del nexo entre la fusión de membranas y la citoquinesis. Posteriormente, se observó que la fusión de vesículas con la membrana plasmática mediada por sintaxina resultaba, asimismo, crítica para la citoquinesis en células animales.

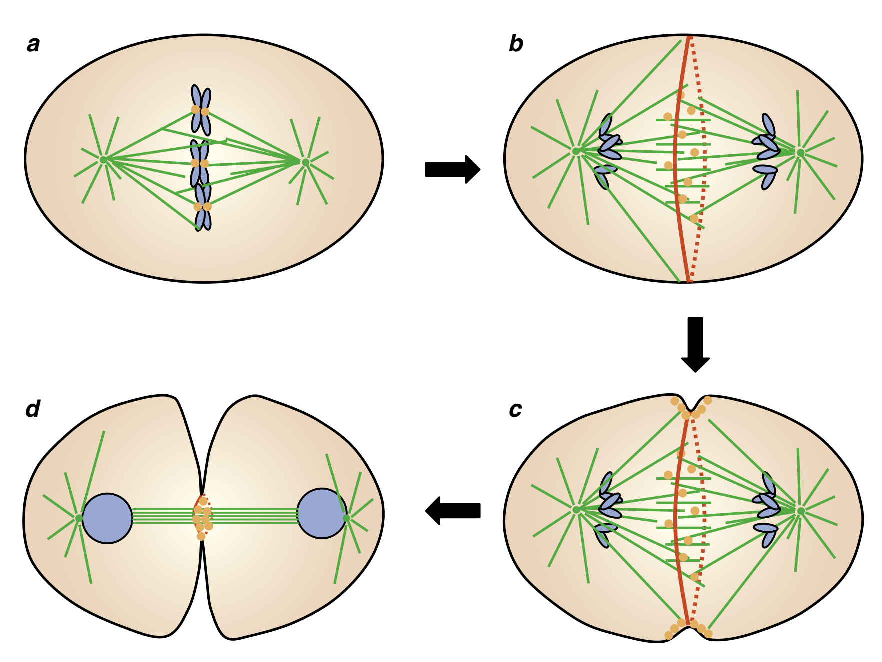
Todos los eucariotas poseen varias sintaxinas, aunque sólo alguna de ellas funciona específicamente en citoquinesis. En el gusano la carencia de sintaxina 1 da lugar a células multinucleadas, con defectos en la invaginación del surco de división, mientras que el homólogo en la mosca es necesario para la celularización, una forma especializada de la división celular. La sintaxina 1 se aloja en el surco de división; las mutaciones en la misma provocan un fallo en la fusión de vesículas, sin repercusión, no obstante, en el transporte de las mismas. Así se asegura que no se produzca la división celular hasta que no se hayan separado los cromosomas.

En células de mamífero, la sintaxina 2 se encuentra en el cuerpo medio. Se la requiere para la abscisión o separación final de las células hijas, pero no para la invaginación del surco de división. Queda así patente que estos dos procesos de la citoquinesis utilizan mecanismos de fusión de membranas, aunque diferentes.

Otro grupo de proteínas de la ruta secretora tiene una función en la citoquinesis. Se trata del complejo exocítico, integrado por siete unidades y requerido para el funcionamiento correcto de la ruta de secreción. Se cree que el complejo exocítico dirige las vesículas hasta sitios específicos de la membrana plasmática. Varios miembros del complejo interaccionan con las septinas, vinculadas a su vez con las sintaxinas.

Regulación espacial

La regulación espacial de la citoquinesis podría transcurrir a través de la regulación de los sitios disponibles para la inserción de nueva membrana. Es posible que el complejo exocítico dirija las vesículas hacia el lugar donde han de fusionarse con la membrana plasmática.



MERCEDES PARDO

5. LOS "PASAJEROS CROMOSOMICOS" son un grupo de proteínas esenciales para la citoquinesis. Al principio de la mitosis o división nuclear, se alojan en los centrómeros, la zona de los cromosomas por donde éstos interaccionan con los microtúbulos del huso mitótico (*a*). Cuando los cromosomas comienzan a separarse, los pasajeros cromosómicos se redistribuyen por los microtúbulos de la zona central del huso (*b*). Algo más tarde, aparecen en la superficie ecuatorial, por donde se va a dividir la célula (*c*). Cuando el anillo se contrae y se invagina la membrana, quedan en el cuerpo medio, una estructura microtubular que une ambas células hijas, para desaparecer tras la separación celular (*d*). Los pasajeros cromosómicos contribuyen a la estabilidad de la zona central del huso y el cuerpo medio, que son esenciales para la citoquinesis.

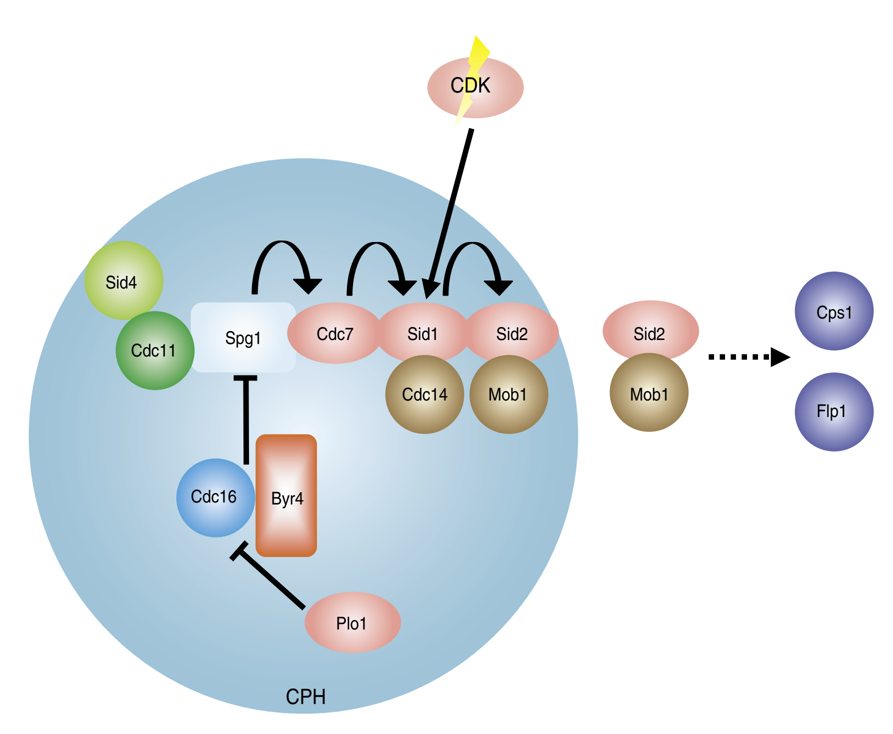
Las septinas podrían funcionar como nexo entre los componentes citoesqueléticos y los componentes membranosos; o, quizá, tener un papel regulador de la delimitación del área de inserción de nueva membrana en el sitio correcto. Esta segunda hipótesis resulta bastante atractiva, sobre todo porque las septinas funcionan a modo de barrera limítrofe entre las células madre e hija durante la división en la levadura *S. cerevisiae*, impidiendo la difusión de factores de crecimiento desde la célula hija a la célula madre. Una vez que las vesículas llegan al lugar de constricción, su fusión con la membrana plasmática está regulada por las sintaxinas presentes en ese punto.

En embriones de vertebrados e invertebrados marinos se ha descubierto un conjunto de microtúbulos tangentes al surco de división. La despolimerización de estos microtúbulos bloquea la inserción de membrana e insta la regresión del surco de división, con el fracaso consiguiente de la citoquinesis. De ello se desprende la importancia, para la división celular, del transporte de componentes membranosos por los microtúbulos. Aunque estas estructuras no se han observado en células somáticas, los microtúbulos de la zona central del huso y el cuerpo medio podrían quizá desempeñar un papel semejante en el caso de las células de mamífero.

Regulación temporal

Para que la división celular culmine con éxito, resulta imprescindible no sólo la coordinación espacial, sino también la coordinación temporal de los distintos episodios del ciclo celular.

La citoquinesis no debe ocurrir antes de la formación del huso mitótico y la segregación de los cromosomas. Si se desarrollara antes de la mitosis, se producirían cambios en el número de cromosomas y, por tanto, en la dotación genética de las células. La citoquinesis constituye un proceso



6. COORDINACION DE LA CITOQUINESIS con el final de la mitosis. La ruta SIN, responsable de ese acompasamiento, se organiza y activa en el cuerpo polar del huso (CPH). Las proteínas Sid4 y Cdc11 persisten en el CPH a lo largo de todo el ciclo celular; constituyen el anclaje para las demás proteínas de esta ruta de señalización. Durante la interfase, la GTPasa Spg1 y su GAP, el complejo Cdc16-Byr4, se alojan en el CPH. La inhibición de Spg1 por Cdc16-Byr4 hace que se mantenga unido a GDP. Cuando la célula entra en mitosis, Cdc16-Byr4 desaparece del CPH, Spg1 se une a GTP, se activa y recluta a la quinasa Cdc7. Al comenzar la anafase, Cdc16-Byr4 vuelve a uno de los CPH y provoca la pérdida de Cdc7 del mismo. Además, al disminuir la actividad de CDK, la quinasa Sid1 junto con Cdc14 es reclutada al CPH donde queda Cdc7. Aquí activan al complejo formado por la quinasa Sid2 y Mob1; instan su traslado hasta el anillo de actina-miosina. La ruta SIN se encarga de ubicar, en la membrana plasmática adyacente al anillo, la enzima responsable de la síntesis del tabique de división, desencadenando la contracción del anillo y la septación. Otro de los efectores de la ruta es la fosfatasa Flp1, que actúa en la salida de mitosis y podría intervenir también en la citoquinesis.

MERCEDES PARDO

acompasadamente coordinado con otros eventos del ciclo.

Las células poseen varios mecanismos para prohibir la citoquinesis hasta que termine la segregación de cromosomas. El primer mecanismo pone en juego a las principales quinasas reguladoras del ciclo celular, CDK (o quinasa dependiente de ciclinas) y la quinasa Polo.

La citoquinesis depende de la entrada de la célula en mitosis, regulada por la Cdk1 y la ciclina B. La inhibición de la actividad quinasa por destrucción de la ciclina inicia la anafase, o separación de los cromosomas. Ahora bien, si se expresa en las células una ciclina que no puede ser degradada por el complejo promotor de la anafase (APC), se bloquea el ciclo celular en anafase; no se pasa a la citoquinesis.

La quinasa Polo, al igual que la CDK, desempeña varias funciones en mitosis. Además, parece cumplir una misión más directa en la citoquinesis. En *S. pombe*, la proteína homóloga a Polo induce la septación en células en G2, indicio claro de que se trata de un regulador principal de la citoquinesis. En las levaduras, la quinasa Polo se aloja en el anillo contráctil. En células animales, Polo, que se encuentra en la zona central del huso y en el cuerpo medio, es decisiva para la citoquinesis. Esta quinasa, además, forma complejos proteicos con varias proteínas de los microtúbulos del cuerpo medio necesarias para el mantenimiento estructural de los mismos. Lo que nos mueve a pensar que el papel de Polo en la citoquinesis atañe a la fosforilación y activación de varias de estas proteínas.

En levaduras se ha identificado un segundo mecanismo para coordinar la citoquinesis con la segregación de los cromosomas. Se trata de una cascada de transducción de señales ubicada en el cuerpo polar del huso (CPH), que se activa durante la mitosis.

La ruta SIN

En *S. pombe* la función de señalización del CPH coordina directamente el final de la mitosis con la citoquinesis; la ruta de señalización se denomina SIN. Aunque las células mutantes en esta vía puedan originar el anillo contráctil, éste no es estable, ni se contrae, sino que se desestructura al final de la mitosis. Pero el ciclo nuclear progresa sin contratiempo y da lugar a células multinucleadas.

El regulador principal de la ruta SIN es la proteína Spg1, una GTPasa. La activación de esta enzima mediante su conversión a la forma unida a GTP desencadena la cascada durante la mitosis. En interfase, Spg1 se mantiene inactiva por su GAP o inhibidor, un complejo formado por las proteínas Cdc16 y Byr4. Al principio de la mitosis se activa Spg1 y se produce el reclutamiento y la activación secuencial de las quinasas Cdc7, Sid1 y Sid2.

La presencia de Sid1 en el cuerpo polar del huso y su activación dependen de la inactivación de CDK. Se asegura con ello que la citoquinesis se demore hasta la segregación cromosómica, coordinando la citoquinesis con la separación de los cromosomas.

La activación de Sid2 provoca su traslado al anillo contráctil, donde insta probablemente la contracción del mismo y la citoquinesis. La contracción del anillo en *S. pombe* está ligada a la formación del septo o pared de separación entre las dos células hijas; uno de los efectores de esta ruta es una enzima responsable de la síntesis del mismo. Es decir, en esta levadura la inhibición de la citoquinesis por la CDK tiene lugar a través de la ruta SIN, impidiendo

la localización y activación de la quinasa Sid1.

La ruta MEN

En la levadura *S. cerevisiae* se descubre una cascada equivalente, denominada MEN, cuya función principal es, sin embargo, la de promover la salida de mitosis. La ruta MEN retrasa la salida de mitosis hasta que el huso mitótico ha pasado por el cuello y se encuentra entre las células madre e hija.

En la regulación de la salida de mitosis, el elemento clave es la fosfatasa Cdc14; corresponde a MEN mantenerla activada. No obstante, la investigación reciente sugiere que esta ruta de señalización podría intervenir en la propia regulación de la citoquinesis. Algunos componentes de la misma se alojan en el cuello entre madre e hija; la ruta es necesaria para la contracción del anillo, aunque el mecanismo no está tan claro como en el caso de la ruta SIN. La pérdida de Flp1, proteína homóloga a Cdc14 en *S. pombe*, provoca fallos en la citoquinesis; con otras palabras, Cdc14 también podría intervenir en la citoquinesis.

Se ignora si las células de mamífero poseen una ruta de señalización equivalente a SIN o MEN. Algunos de los componentes de esta ruta han persistido a lo largo de la evolución; se han encontrado homólogos de la quinasa Sid2/Dbf2, de la GAP Cdc16/Bub2, de Mob1 y de la fosfatasa Cdc14. Pese a que ese dato no supone una prueba definitiva, permite sospechar la existencia de una cascada similar o que hayan persistido, en eucariotas superiores, algunos aspectos de su función al final de la mitosis.

A ese respecto, se ha identificado en células de mamífero la centriolina, una proteína que posee una zona semejante a Cdc11/Nud1, las proteínas responsables del anclaje de las rutas SIN/MEN en el cuerpo polar del huso. La centriolina interviene en los episodios finales de la citoquinesis, en la separación celular en concreto, amén de requerírsela para la progresión hacia la siguiente fase S, otro apoyo más para esta hipótesis.

El cuerpo polar del huso se perfila así como regulador principal de la citoquinesis en levaduras, en un proceso coordinado con la división nuclear. El centrosoma, la estructura equivalente en células animales, muestra, a su vez, su relevancia en la terminación de la citoquinesis. En células humanas, el equipo dirigido por Piel ha observado que, en los últimos estadios de la citoquinesis, el centriolo madre se mueve hacia el puente de unión entre las dos células hijas. Hasta que no ha regresado a su posición inicial, no se completa la citoquinesis y tiene lugar la separación de las dos células. Abona esa observación la hipótesis de que el centrosoma ejerza alguna función de control espacial sobre la citoquinesis, semejante al papel del cuerpo polar del huso en levaduras. Añádase que la falta de centrosomas provoca fallos en la citoquinesis.

Citoquinesis, desarrollo y enfermedad

No todas las células se dividen por el ecuador celular para originar dos células hijas del mismo tamaño. La primera división del embrión de *C. elegans* o la división de neuroblastos de *Drosophila*, por ejemplo, se desarrollan de forma asimétrica, con el resultado de dos células de distinto tamaño y contenido. Esta división asimétrica es parte del mecanismo para determinar el destino de las células hijas durante el desarrollo del organismo.

La investigación de ese aspecto de la citoquinesis ha llevado a la identificación de los factores determinantes de la asimetría de la división. En ausencia de los mismos, las células se dividen por el ecuador y se originan dos células hijas iguales. El modelo más extendido supone que la reorientación del huso mitótico hacia un extremo de la célula se debe al distinto dinamismo de los microtúbulos en ambos polos celulares, causado por diferencias en las interacciones entre microtúbulos y superficie celular; de ello resultan distintas fuerzas ejercidas en los polos del huso y el desplazamiento de éste hacia uno de los extremos celulares.

Otra de las formas especializadas de citoquinesis es la citoquinesis incompleta. Se observa durante el desarrollo del oocito de *Drosophila* o en la espermatogénesis en mamíferos. En este tipo de división, el surco de división se invagina, pero no llega a cerrarse ni, por ende, separar las células hijas. No se sabe muy bien si en estos tipos celulares existen factores que impiden que se complete la citoquinesis o si carecen de los factores necesarios para culminarla. Estos dos sistemas resultan muy útiles para la investigación del mecanismo de la citoquinesis.

El cáncer se caracteriza por una proliferación incontrolada de células que no responden a las señales del desarrollo normal. La inhibición o el mal funcionamiento de la citoquinesis puede contribuir a que una célula gane o pierda genes, promoviendo su transformación en célula cancerosa. Pero, por otra parte, los procesos necesarios para la proliferación celular constituyen dianas habituales en la terapia antitumoral. La citoquinesis no parece estar sometida a puntos de control que impiden que la célula continúe el ciclo celular en caso de algún fallo; pudiera, pues, ser una eficiente diana para nuevas drogas antitumorales. De momento sólo se ha identificado un punto de control de este tipo en levaduras.

La citoquinesis es un ejemplo extraordinario de mecánica celular. Pese a los avances en el esclarecimiento de cómo funciona y está regulada la bioquímica responsable de la citoquinesis, aún quedan muchos misterios por descubrir.

La autora

Mercedes Pardo, doctorada en Farmacia por la Universidad Complutense de Madrid, trabaja en el Laboratorio de Ciclo Celular de Cancer Research UK en Londres.

Bibliografía complementaria

ANIMAL CELL CYTOKINESIS. M. Glotzer, en *Annual Reviews in Cell and Developmental Biology*, vol.17, págs. 351-386; 2001.

CYTOKINESIS IN PROKARYOTES AND EUKARYOTES: COMMON PRINCIPLES AND DIFFERENT SOLUTIONS. N. Nanninga, en *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, vol. 65, págs. 319-333; 2001.

CYTOKINESIS IN EUKARYOTES. D. A. Guertin, S. Trautmann y D. McCollum, en *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, vol. 66, págs. 155-178; 2002.



1. UN APARATO DE RAYOS X NATURAL: Estudios recientes muestran que los rayos emiten erupciones de rayos X mientras abren sus zigzagueantes canales conductores por la atmósfera. Las energías de los rayos X llegan a 250.000 electronvolt, más o menos el doble de energía que los rayos X aplicados en medicina.

El rayo

Nuevas investigaciones subrayan la sorprendente complejidad de las tormentas eléctricas. El rayo sigue planteando problemas desconcertantes

Joseph R. Dwyer



SLIM FILMS

Los rayos causan más muertos y heridos que los huracanes o los tornados. Atacan de repente, sin ningún signo preanunciador; a veces incluso cuando en la vertical no hay ni una nube. Relampaguean en la Tierra alrededor de cuatro millones de veces al día. Se los ha observado en otros planetas. Y, sin embargo, todavía ignoramos qué los causa.

No es cierto que Benjamín Franklin resolviese el problema cuando realizó su famoso experimento de la cometa en 1752. Sólo probó que el rayo es un fenómeno eléctrico. Hasta el día de hoy, sigue sin saberse de qué modo las tormentas generan su carga eléctrica y producen la descarga. Algunos han aventurado que los rayos cósmicos inician el proceso. Esas partículas de alta energía, al bombardear la Tierra desde el espacio, desencadenan en la atmósfera cascadas de electrones veloces.

Se ha descubierto hace poco una nueva vía de investigación: examinar los rayos X que se emiten cuando cae un rayo desde la nube hasta el suelo. En los últimos años, nuestro grupo ha medido los rayos X producidos tanto por rayos tormentosos naturales como por rayos de origen artificial, generados mediante el lanzamiento de cohetes durante una tormenta. Los resultados sugieren que el rayo abre sus irregulares canales conductores enviando ráfagas de electrones de alta velocidad. Pero acerca de cómo se aceleran esos electrones, sólo hay

confusión. Para resolver el misterio, estamos construyendo un conjunto de detectores de rayos X en un lugar de Florida.

No son meras chispas

En algunos aspectos, el rayo se parece a una gran chispa. Pensemos en una chispa corriente, como la que se produce cuando se toca el pomo de una puerta tras haber andado por una alfombra. Los zapatos desprenden electrones, de modo que acumulamos carga eléctrica. Nos rodea así un campo eléctrico. Cuando el campo es débil, el aire constituye un buen aislante: los electrones se unen a los átomos de oxígeno a mayor velocidad que se desprenden por acción de los choques; la corriente eléctrica no circula en cuantía apreciable. Pero cuando los dedos se acercan al pomo, el campo eléctrico se refuerza localmente. Si alcanza un valor crítico de unos tres millones de volts por metro (campo de ruptura), el aire se vuelve conductor y se produce la descarga: una corriente salva el hiato entre la mano y el pomo.

La electrización de las tormentas comparte algunas semejanzas con el ejemplo de la alfombra. En el interior de la nube tormentosa, el papel de los zapatos sobre la alfombra le corresponde, con toda probabilidad, al granizo blando —formado por gránulos de nieve— que cae entre los cristales de hielo y las gotículas de agua. (Todavía se debate acerca de los detalles del proceso.) Cuando estas partículas chocan entre sí, pueden arrancar electrones y adquirir carga eléctrica. Las cargas positivas y las negativas se separan después por la acción de las corrientes ascendentes y la gravedad, con lo que se genera una diferencia de potencial. Pero si tratamos de llevar más allá la analogía del pomo, tropezamos con un serio problema: las decenas de medidas realizadas mediante globos, aviones y cohetes directamente en el interior de las nubes rara vez han encontrado campos de intensidad superior a 200.000 volts por metro. Tamaña intensidad basta para causar en el aire una ruptura, como ocurre cuando tocamos el pomo.

Hasta hace poco, dos eran las explicaciones preferidas. Según la primera, cabría la existencia de campos eléctricos más intensos en el interior de las tormentas, pero sólo en volúmenes más pequeños, por lo que costaría medirlos. Aunque la observación no ha podido descartar tal hipótesis, no resulta satisfactoria, pues con ella sólo reemplazamos un problema por otro: ¿cómo se producen campos eléctricos tan intensos en volúmenes de nube tan pequeños? La segunda explicación proviene de los experimentos que muestran que el campo eléctrico necesario para producir una descarga disminuye apreciablemente cuando hay gotas de agua o partículas de hielo en el aire, como ocurre en el interior de las tormentas. Por desgracia, añadir lluvia o hielo sólo alivia parte de la discrepancia; el campo en las tormentas todavía parece demasiado débil para generar una descarga común.

Tampoco se está muy seguro acerca de cómo atraviesa el rayo varios kilómetros de aire. El proceso comienza con la formación de una guía, un canal caliente que ioniza el aire y transporta cargas a lo largo de grandes distancias (*véase el recuadro* “La breve vida del rayo”). La guía no se propaga hasta el suelo sin solución de continuidad; lo hace a través de una serie de pasos discretos. No se sabe con exactitud de qué manera. Estas dificultades han conducido a muchos, entre los que me cuento, a preguntarse si no se nos habrá escapado algo importante. Tal vez no deba considerarse al rayo una descarga corriente, análoga a una chispa en el pomo de una puerta. Existe otra clase de descarga, menos habitual: la “ruptura desbocada”.

En una descarga corriente, los electrones se mueven despacio porque sufren constantes choques con las moléculas del aire. Los choques crean una fuerza de arrastre efectiva, semejante a la que se siente cuando se saca la mano por la ventana de un coche: cuanto mayor es la velocidad, más aumenta la fuerza de rozamiento, y cuando el coche frena, disminuye. Pero si las velocidades de los electrones adquieren cierto valor —al menos seis millones de metros por segundo, que viene a ser un dos por ciento de la velocidad de la luz— la fuerza de arrastre decrece tanto más cuanto más deprisa se mueven los electrones (*véase la figura 2*). Si un campo eléctrico intenso acelera un electrón de alta velocidad, la fuerza de rozamiento disminuye; entonces, el electrón se mueve a mayor velocidad todavía, con lo que se reduce aún más la fuerza de rozamiento, y así sucesivamente. En esas condiciones, los electrones pueden acelerarse hasta casi la velocidad de la luz; es decir, adquirir enormes cantidades de energía y producir la “descarga desbocada”.

Este proceso requiere una población inicial de electrones con altas energías. En 1925, C. T. R. Wilson planteó que la desintegración de isótopos radiactivos o los choques de las partículas de los rayos cósmicos con las moléculas del aire quizá generasen electrones de alta energía que se desbocarían en los campos eléctricos del interior de la nube de tormenta. Por desgracia, el modelo de Wilson predecía un número de electrones desbocados producidos por la desintegración radiactiva y los choques de rayos cósmicos demasiado escaso para generar rayos.

En 1961, Alexander V. Gurevich, del Instituto Lebedev de Física de Moscú, propuso otro mecanismo de producción de electrones desbocados. Mostró que se los podía crear en cuantía notable dentro de cam-

Resumen/La naturaleza del relámpago

- Los rayos de las tormentas desconciertan a los físicos. Los campos eléctricos del interior de las tormentas no parecen tener la intensidad suficiente para generar una descarga eléctrica ordinaria.
- El reciente descubrimiento de emisiones de radiación X en los rayos de las tormentas apoya la hipótesis de que éstos, de una manera aún desconocida, aceleran los electrones hasta casi la velocidad de la luz; a este fenómeno se le llama “ruptura desbocada”.
- Se está instalando en Florida un conjunto de detectores de rayos X para estudiar los procesos que inician los relámpagos y permiten su propagación.

LA BREVE VIDA DEL RAYO

Algunos creen que el desencadenamiento de los rayos de las tormentas puede deberse a los rayos cósmicos, las partículas de alta energía que bombardean la Tierra desde el espacio.

Protón

Molécula de aire

1 Un protón que se mueve velozmente procedente del espacio choca con una molécula del aire (nitrógeno u oxígeno) en la alta atmósfera y produce una lluvia de partículas de alta energía

Región de carga negativa

– – – – – – – –

– – – – – – – – – –

– – – – – – – –

Electrón de alta energía que hace de semilla

2 Las partículas de la lluvia, entre las que hay electrones de alta energía, chocan contra las moléculas del aire en el interior de una nube de tormenta y liberan otros electrones de alta energía. Aceleradas por el campo eléctrico que se extiende entre las regiones de carga negativa y positiva, las partículas inician una avalancha de electrones desbocados, que generan rayos gamma en su avance a través de la nube. Esta “ruptura desbocada” puede servir de catalizador para el rayo

Electrón desbocado

Rayos gamma

+ + + + + + + + +

Región de carga positiva

Nube de tormenta

Choque con molécula del aire

Rayos X

Guía escalonada

3 Una vez se inicia el rayo, los electrones excavan un canal ionizado, o “guía escalonada”. En cada paso, los electrones se acumulan en el extremo de la guía, donde crean un campo intenso y local que acelera nuevos electrones desbocados. Las partículas, al chocar con las moléculas del aire, emiten brotes de rayos X. El proceso se repite hasta que la guía escalonada, que puede ramificarse, llega al suelo

4 Una vez que la guía escalonada llega al suelo, circula un fuerte impulso de corriente por el canal, el rayo de retorno. La corriente calienta el aire hasta los 30.000 grados; se produce entonces el destello de radiación visible, el relámpago

Corriente de electrones a través del canal ionizado

Radiación visible

Suelo

+ + + + + + + + + Región de carga positiva

ALISON KENDALL



WARREN FAIDLEY *Weatherstock.com*

pos eléctricos muy intensos si se los aceleraba directamente a partir de la ubicua población de electrones libres de baja energía. Desaparecía así el problema con que tropezó Wilson: la escasez de electrones de alta energía. Para generar tales electrones desbocados, Gurevich recurría a la fuerza bruta, con campos eléctricos tan intensos, que algunos de los electrones de baja energía se aceleraban rápidamente hasta alcanzar y superar el umbral de energía más allá del cual pueden desbocarse. El problema de este mecanismo es que requiere un campo eléctrico unas diez veces mayor que el campo de ruptura ordinario, mucho mayor, a su vez, que los campos observados en las tormentas. En pocas palabras: los físicos parecían estar encaminándose en una dirección errónea.

Finalmente, en 1992 surgió una idea que prometía llegar a explicar lo que sucede en el interior de las tormentas y cómo se produce el rayo. Gurevich, junto con Genady M. Milikh, de la Universidad de Maryland, y Robert Roussel-Dupré, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, propusieron el modelo de la Avalancha Relativista de Electrones Desbocados. De acuerdo con este modelo, los propios electrones desbocados generan, al chocar bruscamente con las moléculas del aire y arrancar otros electrones de alta energía, más electrones de alta energía que servirán de nuevas semillas para el proceso. Estos electrones arrancados se desbocan y chocan con otras moléculas del aire, se producen entonces más electrones semilla, y así sucesivamente. Se crea una gran avalancha de electrones de alta energía que crece exponencialmente con el tiempo y la distancia. Puesto que este proceso lo puede iniciar un solo electrón de alta energía que haga de semilla, basta el fondo continuo de choques de rayos cósmicos y desintegraciones radiactivas para desencadenar una avalancha de electrones desbocados. Y mientras la avalancha no salga de una región de intenso campo eléctrico, seguirá creciendo indefinidamente. El resultado será una ruptura desbocada.

Además, a diferencia de la antigua hipótesis de Gurevich, este nuevo modelo de la ruptura desbocada requiere un campo eléctrico de una intensidad de sólo una décima parte de la requerida para una ruptura normal en aire seco. A la altura de las nubes tormentosas, donde la densidad del aire es menor que al nivel del mar, el campo eléctrico necesario para esta clase de ruptura desbocada es de unos 150.000 volts por metro, dentro del margen de los valores que se miden en las tormentas. No debe de ser una coincidencia que vengan casi a coincidir el máximo campo eléctrico observado en el interior de las nubes de tormenta y el requerido para una ruptura desbocada; mis cálculos han mostrado que la ruptura desbocada no tardaría en descargar el campo eléctrico si aquélla fuera mucho más intensa.

En una descarga normal, los electrones tienen bajas energías y viajan bastante despacio, de modo que la radiación electromagnética que se emite se extiende sólo hasta los ultravioletas. Por el contrario, en una ruptura desbocada los electrones, que se mueven a gran velocidad, ionizan gran número de moléculas del aire y producen rayos X de alta energía y rayos gamma. (El fenómeno se conoce con la expresión alemana *bremsstrahlung*, que significa radiación de frenado.) Por consiguiente, una manera de comprobar si hay ruptura desbocada es buscar rayos X.

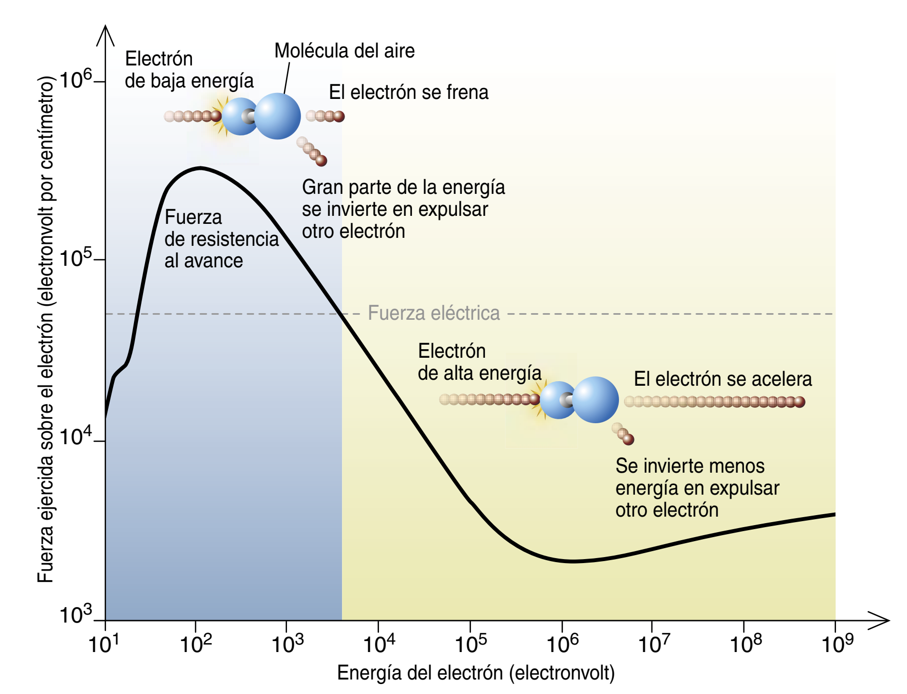
Relámpagos de rayos X

Desde los años treinta, con el acicate primero de las hipótesis de Wilson y luego del trabajo de Gurevich, se viene intentado observar la formación de rayos X en las tormentas eléctricas. Cuesta tanto, que hasta hace muy poco sólo se han tenido resultados ambiguos. Una de las dificultades reside en que los rayos X no se propagan largas distancias en el interior de la atmósfera: son absorbidos a unos pocos cientos de metros de la fuente. Otro problema es que las tormentas constituyen ambientes electromagnéticamente ruidosos. Los rayos, en particular, emiten grandes cantidades de ruido en radiofrecuencias, que causan a muchos kilómetros de distancia los conocidos chirridos de las radios de onda media. Para detectar los rayos X hay que registrar señales eléctricas muy débiles. Tratar de realizar una medición así en la vecindad de las tormentas es como intentar oír una conversación en un lugar muy ruidoso. Como puede resultar difícil distinguir las señales eléctricas reales producidas por los rayos X de las señales espurias debidas a las emisiones de radiofrecuencia, muchos de los primeros resultados se recibieron con escepticismo.

La situación mejoró en el decenio de 1980, cuando George K. Parks, Michael P. McCarthy y sus colaboradores de la Universidad de Washington realizaron observaciones desde aviones en el interior de tormentas. Más tarde, Kenneth B. Eack, actualmente en el Instituto de Minería y Tecnología de Nuevo México (NMT), y sus colaboradores acometieron una serie de sondeos mediante globos en el interior de nubes tormentosas. Estas observaciones proporcionaron valiosos indicios de que las tormentas producen a veces grandes brotes de rayos X. No se pudo determinar la fuente, pero la radiación parecía guardar relación con campos eléctricos reforzados presentes en el interior de las nubes. En ocasiones, la emisión de rayos X comenzaba justo antes de que se observaran los relámpagos y cesaba una vez se habían producido, quizá porque los rayos cortocircuitaban el campo eléctrico que requiere la ruptura desbocada.

No se conoce mecanismo alguno, aparte de la ruptura desbocada, capaz de producir tamañas cantidades de rayos X en nuestra atmósfera. No hay otros fenómenos asociados con las descargas de las tormentas eléctricas a los que se puedan atribuir las emisiones: aunque calientan el aire hasta los 30.000 grados —cinco veces la temperatura de la superficie del Sol—, apenas se producen rayos X a esta temperatura.

Por fin, en 2001 se halló una conexión directa entre los rayos X y las chispas: Charles B. Moore y sus colaboradores del NMT observaron



2. LOS ELECTRONES "DESBOCADOS" abren el camino de los rayos. Los electrones de baja energía, que se mueven despacio, pierden más energía por los choques con las moléculas de aire de la que ganan por efecto del campo eléctrico; van, pues, perdiendo cada vez más velocidad. Pero como los electrones de alta energía pierden así menos energía, el campo eléctrico puede acelerarlos hasta casi la velocidad de la luz.

ALISON KENDALL

radiación de alta energía, presumiblemente radiación X, procedente de descargas de rayos sobre la cima de una alta montaña. A diferencia de las anteriores observaciones con aviones y globos, esta radiación de alta energía parecía producida por el propio rayo y no por los campos eléctricos a gran escala del interior de la nube tormentosa. Además, las emisiones ocurrían durante la primera fase del rayo; el movimiento de la guía desde la nube hasta el suelo. Esta observación constituía toda una novedad.

Mi contribución empezó en ese punto. Como físico, siempre me ha interesado la manera en que se producen los rayos X y gamma. Aunque estas radiaciones son corrientes en el espacio, donde el vacío permite a las partículas de alta energía viajar sin impedimento, resultan mucho más raras en la Tierra. De ahí que me fascinara el modelo de ruptura desbocada de Gurevich, Milikh y Roussel-Dupré, según el cual la misma clase de rayos X que se genera en las fulguraciones solares se produce en tormentas y relámpagos. Para comprobar si existían esos rayos X, aproveché las diarias tormentas de verano de la Florida central.

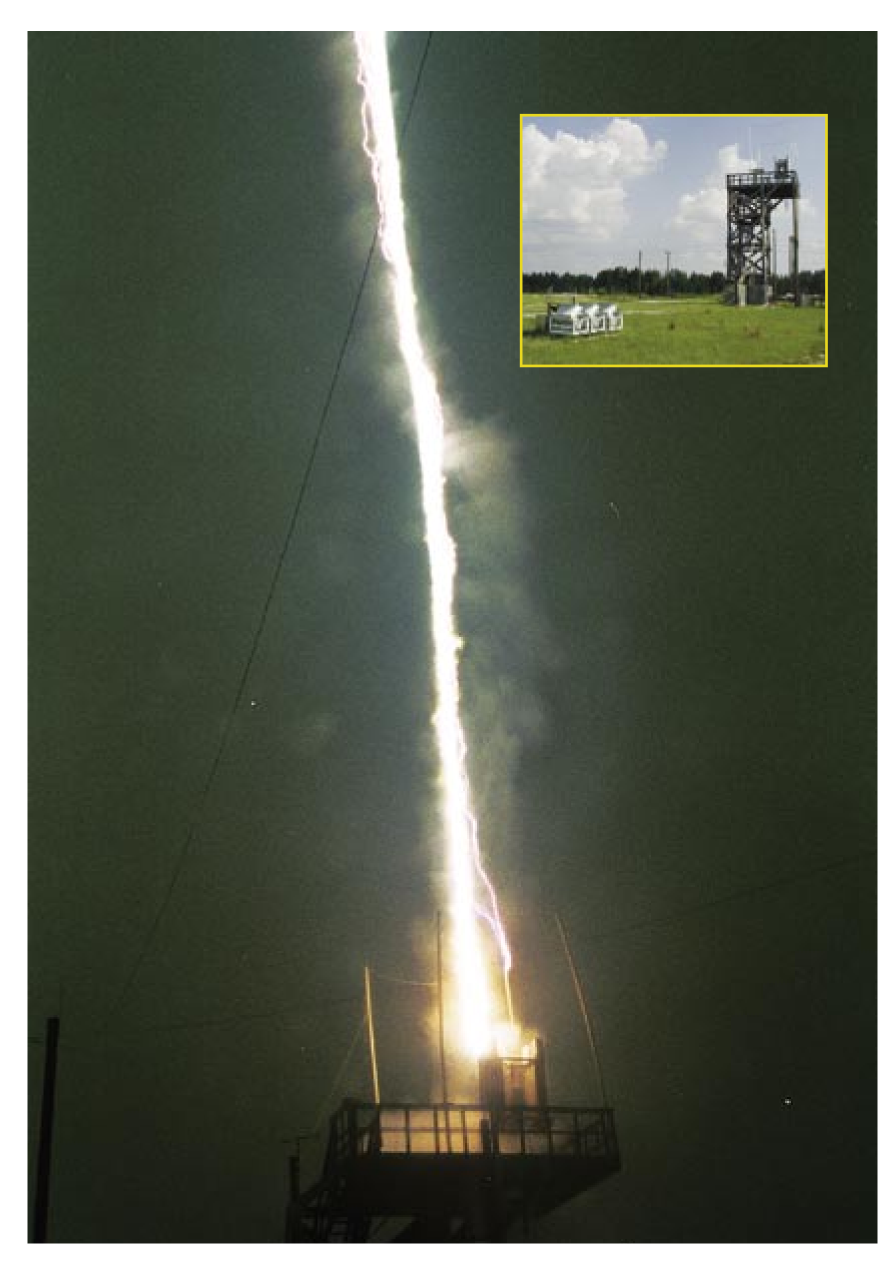
El año 2002, con apoyo de la Fundación Nacional de la Ciencia, mi grupo del Instituto de Tecnología de Florida, en colaboración con Martin A. Uman y su grupo de la Universidad de Florida, inició una campaña sistemática de búsqueda de radiación X emitida por los rayos de las tormentas. Para reducir el problema de las señales espurias, colocamos detectores sensibles de rayos X en el interior de pesadas cajas de aluminio que impedían la entrada de la humedad, la luz y el ruido de radiofrecuencia. Instalamos nuestros instrumentos en el Centro Internacional de Investigación y Prueba de Relámpagos (ICLRT) de Camp Blanding. El ICLRT está equipado para medir, entre otras cosas, los campos eléctricos y magnéticos y las emisiones ópticas asociadas a los rayos. Además, la instalación está preparada para desencadenar artificialmente rayos en tormentas naturales por medio de pequeños cohetes.

Cuando sobre el ICLRT estalla una tormenta y el campo eléctrico alcanza en el suelo varios miles de volts por metro, se lanza un cohete de un metro de largo desde una torre de madera. El cohete desenrolla un carrete de alambre de cobre recubierto de kevlar, un extremo del cual queda unido al suelo. Al subir el cohete hasta una altura de 700 metros, el alambre vertical anclado en el suelo refuerza el campo eléctrico en la punta del cohete; se tiene así una guía que se propaga verticalmente y va introduciéndose en la nube tormentosa. La corriente eléctrica que asciende desde el suelo hasta la guía vaporiza rápidamente el alambre. Alrededor de la mitad de los lanzamientos provocan rayos en las nubes situadas encima; por lo general caen sobre el lanzador de cohetes.

Tanto los rayos naturales como los artificiales se componen generalmente de varias descargas. En los rayos provocados, cada descarga se inicia con una columna de carga que se propaga hacia abajo, el "dardo guía"; en la cercanía del suelo sigue más o menos el camino abierto por el cohete y el alambre. Aporta carga negativa desde la nube e ioniza el canal en su movimiento de avance. Una vez ha conectado con el suelo, se crea un cortocircuito y a través del canal fluye un gran impulso de corriente, el "rayo de retorno", que calienta rápidamente el canal y produce el relámpago, la emisión óptica que vemos; la rápida dilatación subsiguiente del aire caliente crea el trueno. Tras el rayo de retorno puede venir otro rayo conductor, con lo que se repite el proceso. La rápida sucesión de descargas induce el parpadeo del canal guía.

En los rayos naturales, desempeña el papel del cohete una guía escalonada que abre el camino ionizado, extendiéndose mediante tramos irregulares desde la nube hasta el suelo. Las descargas subsiguientes de los rayos naturales, sin embargo, se inician mediante un dardo guía. Se asemejan, pues, a las descargas de los rayos provocados. La ventaja de estudiar estos últimos es que se puede controlar el momento exacto y el lugar del rayo. Y mejor aún, podemos repetir una y otra vez el experimento. Cada verano, se provocan docenas de rayos en el ICLRT.

A decir verdad, dada la larga historia de resultados negativos y ambiguos con rayos X, no esperaba,



3. **SE PROVOCA UN RAYO** en el Centro Internacional de Investigación y Pruebas de Rayos (ICLRT) de Florida mediante el lanzamiento de un pequeño cohete desde una torre de madera (*recuadro*) durante una tormenta. El cohete, al desenrollar un alambre que lleva corriente desde el suelo, crea un camino para el rayo. Instrumentos situados en la vecindad miden la energía y la intensidad de los rayos X emitidos.

cuando instalamos nuestros instrumentos en el ICLRT, que llegásemos a captarlos. Por eso, tras haber acometido las primeras mediciones de relámpagos provocados, dejé en el cajón de la mesa los resultados. Transcurrida una semana larga, representé gráficamente con mi alumno Maher Al-Dayeh los datos de los detectores de rayos X. Para mi sorpresa —y la de casi todos los demás—, descubrimos que los rayos provocados producían grandes cantidades de rayos X casi en cada ocasión. Eran tan intensos, que nuestros instrumentos quedaban temporalmente cegados por la radiación.

Los experimentos que efectuamos al año siguiente mostraron que los dardos guía de los rayos producen la emisión de rayos X, posiblemente con alguna contribución del comienzo de las descargas de retorno. Las energías de los rayos X alcanzan unos 250.000 electronvolt, el doble más o menos de la energía de una radiografía de tórax. Esa emisión de rayos X no se produce continuamente, sino en rápidos estallidos separados por una millonésima de segundo. Si tuviéramos visión de rayos X, los rayos nos parecerían muy diferentes. A medida que el rayo guía se propaga hacia abajo, veríamos una rápida serie de brillantes destellos descendiendo desde las nubes. Los destellos se irían intensificando al acercarse al suelo, con un estallido final muy intenso en el instante de iniciarse el rayo de retorno. Aunque el subsiguiente impulso de corriente brillaría en luz visible, aparecería negro en rayos X.

La emisión de rayos X por los rayos de una tormenta indica que alguna forma de ruptura debe intervenir para que los electrones se aceleren hasta el punto de desprender una radiación de *bremsstrahlung*. Pero resulta que nuestras medidas no encajan bien con el modelo de Gurevich, Milikh y Roussel-Dupré. Los rayos X que observamos tenían energías mucho más bajas que las predichas por ese modelo de la avalancha; la propia intensidad de los brotes fue mucho más alta de lo esperado. Los resultados apuntan a que los campos eléctricos producidos por las descargas guía son muchísimo mayores de lo que antes se había creído posible. Tiene su ironía que nuestros experimentos indiquen por ahora que el mecanismo que opera en las descargas guía se parece más al antiguo modelo de ruptura desbocada de Gurevich: aquel que en 1961 requería un campo eléctrico tan intenso que se descartó. Sigue siendo un misterio la manera en que los relámpagos generan campos eléctricos tan intensos, pero las venideras observaciones de rayos X deberán orientarnos al respecto.

Desde el descubrimiento inicial de la radiación X procedente de los rayos provocados, hemos observado también en el ICLRT varias descargas eléctricas naturales. Los datos correspondientes mostraron buenas emisiones de rayos X procedentes de la fase de la guía reforzada, una confirmación de las anteriores medidas del NMT. Además, los rayos X llegaban en rápidos brotes justo en los instantes en que la guía iniciaba el camino hacia abajo. Este resultado demuestra que la ruptura desbocada

participa en el guiado escalonado: determina dónde irá el rayo y cómo se bifurcará. Un mecanismo similar entra también en funcionamiento durante las fases de dardo guía de las descargas subsiguientes.

Las emisiones de rayos X de las descargas naturales se parecen mucho, pues, a las que se detectan en las provocadas. Está cada vez más claro que la ruptura desbocada es un fenómeno común de nuestra atmósfera. Pese a que las moléculas del aire dificultan la aceleración de los electrones veloces, observamos indicios de rupturas desbocadas incluso cerca del suelo, donde el aire es más denso. (La mayoría de los rayos X que observamos provenían de los 100 metros inferiores, más o menos, del canal del rayo eléctrico.) Por lo tanto, la ruptura desbocada debería ocurrir con mayor frecuencia a la altura de las tormentas.

Otra vez en la tormenta

Volvamos a la iniciación del rayo dentro de la tormenta. En los últimos años, se han construido modelos prometedores en los que la acción combinada de las lluvias de partículas creadas por el impacto de la radiación cósmica y la ruptura desbocada genera los rayos. Como basta un electrón semilla de alta energía para desencadenar una gran avalancha de electrones desbocados, la descarga generada por una intensa lluvia de rayos cósmicos —millones de partículas semilla de alta energía que lleguen simultáneamente— debe de ser enorme. Una descarga de esa magnitud aportará un reforzamiento local del campo eléctrico en el frente de la avalancha; por una razón: el gran aumento de la carga eléctrica en dicho frente. Este refuerzo equivaldría a la cercanía de un dedo y el pomo de una puerta; el campo eléctrico se intensificaría brevemente hasta el punto de que se generase una ruptura eléctrica ordinaria.

Nuestros experimentos en el ICLRT del verano de 2004 aportaron un extraordinario elemento de juicio a favor de la existencia de rupturas desbocadas en las nubes. Durante el lanzamiento del último cohete de la campaña, captamos un enorme estallido de radiación de muy alta energía —rayos gamma, no rayos X— con tres detectores colocados a 650 metros del canal del relámpago. Las energías de los fotones de esos rayos gamma superaban los 10 millones de electronvolt; eran 40 veces mayores que las energías de la radiación X que habíamos observado previamente en las guías de rayos.

Basándonos en nuestras mediciones de la corriente del canal del relámpago, los campos eléctricos y las propiedades de los rayos gamma, hemos deducido que la fuente de la emisión se hallaba a muchos kilómetros de altura, en el interior de la nube tormentosa. No esperábamos ver rayos gamma procedentes de esta altitud porque la atmósfera absorbe dicha radiación, pero al parecer la intensidad de la fuente era tan grande, que algunos fotones consiguieron llegar hasta el suelo. Este descubrimiento da a entender que debieron de producirse poderosas rupturas desbocadas en la nube en un proceso relacionado con la iniciación del rayo provocado. Nuestras observaciones demuestran que es posible observar el fenómeno desde el suelo, lo que resulta mucho más sencillo que subir los detectores a bordo de aviones o globos. Además, se ha sabido hace poco que el Creador de Imágenes Espectroscópicas Solares de Alta Energía Reuven Ramary (RHESSI) detectó brotes de rayos gamma asociados a tormentas parecidos al nuestro desde su órbita a 600 kilómetros de altura.

Con una nueva subvención de la Fundación Nacional de Ciencia de los EE.UU., estamos ahora incrementando el número de instrumentos de rayos X en el ICLRT de cinco a más de 36; cubrirán un kilómetro cuadrado de la instalación de Camp Blanding. Este incremento debería mejorar nuestra capacidad de estudiar los relámpagos naturales y provocados; esperamos que aumente la probabilidad de detectar brotes de rayos gamma procedentes de las nubes tormentosas. Las emisiones de rayos X y gamma servirán de sonda de los campos eléctricos en regiones difíciles de medir por otros medios. Con esos datos deberíamos entender mejor los procesos de rotura que inician el rayo y facilitan su propagación.



WARREN FAIDLEY *Weatherstock.com*

El recurso a la radiación X para estudiar los rayos se encuentra dando los primeros pasos. Por eso, cada vez que llevamos a cabo un experimento hallamos algo que no conocíamos antes. Ya hemos descubierto que el rayo no es una chispa ordinaria de la misma clase que las que se producen cuando se toca el pomo de una puerta. Se trata de un tipo de descarga mucho más extraño, que produce electrones desbocados y rayos X.

El autor

Joseph R. Dwyer es profesor de física y ciencias del espacio en el Instituto de Tecnología de Florida. Tras doctorarse por la Universidad de Chicago en 1994, investigó en las de Columbia y Maryland. El autor agradece las aportaciones a esta investigación de H. Rassoul, V. Rakov, M. Al-Dayed, J. Jerauld, L. Caraway, B. Wright, K. Rambo y D. Jordan.

Bibliografía complementaria

THE ELECTRICAL NATURE OF STORMS. Donald R. McGorman y W. David Rust. Oxford University Press, 1998.

THE LIGHTNING DISCHARGE. Martin A. Uman. Dover Publications, 2001.

ENERGETIC RADIATION PRODUCED DURING ROCKET-TRIGGERED LIGHTNING. Joseph R. Dwyer *et al*. en *Science*, vol. 299, págs. 694-697; 31 de enero, 2003.

LIGHTNING PHYSICS AND EFFECTS. Vladimir A. Rakov y Martin A. Uman. Cambridge University Press, 2003.

¿Se puede detener a las clamidias?

Las clamidias producen una enfermedad de transmisión sexual muy extendida, son la principal causa de ceguera evitable y quizás intervengan en las enfermedades cardiacas. Los descubrimientos recientes sugieren nuevas vías para frenar su proliferación

David M. Ojcius, Toni Darville y Patrik M. Bavoil

La palabra clamidia evoca, de inmediato, una enfermedad de transmisión sexual muy extendida. Pero, en puridad, es el nombre de un género de bacterias responsables de un extenso repertorio de enfermedades graves.

En Africa, una madre pobre quizá nos cuente que las moscas que transmiten la clamidia son las responsables de que sus hijos sufran conjuntivitis, una dolorosa alteración ocular. Esta enfermedad, causada por una cepa de *Chlamydia trachomatis* (la misma especie que origina la enfermedad de transmisión sexual aludida), deriva en tracoma, una afección que en ocasiones termina en ceguera. En los países industrializados, una especie aérea, *C. pneumoniae*, provoca resfriados, bronquitis y alrededor del diez por ciento de las neumonías adquiridas fuera de los hospitales. Se ha sugerido incluso una relación entre *C. pneumoniae* y la aterosclerosis, el estrechamiento arterial que desemboca en infartos de miocardio y accidentes cerebrovasculares.

Al tratarse de bacterias, las clamidias responden a los antibióticos. Sin embargo, la enfermedad a menudo pasa inadvertida. Por varias razones. Las infecciones genitales, por ejemplo, no suelen producir síntomas al principio. Por lo que respecta al tracoma, auténtico azote de países en vías de desarrollo, la población apenas tiene acceso a un tratamiento y a una higiene adecuados. Si no se toman medidas, buena parte de los 600 millones de personas infectadas con una o más cepas de *Chlamydia* seguirán viviendo sin atención médica hasta que las consecuencias sean irreversibles.

Pecaríamos de ingenuos si confiáramos en la posibilidad de detectar absolutamente todos los casos de enfermedad de transmisión sexual o esperáramos que una mejora de las medidas higiénicas erradicaría en poco tiempo el tracoma en el Tercer Mundo. Las mayores esperanzas para frenar la proliferación de las clamidias están puestas en las vacunas y otros tratamientos preventivos. Para hallar agentes que eviten la infección, necesitamos ahondar en la biología de estos microorganismos: su multiplicación, proceso de infección y mecanismos moleculares de actuación.

No es fácil recabar toda esa información. Disponen de un sinfín de estrategias para eludir el sistema inmunitario del huésped. Además, su estudio en el laboratorio entraña notables dificultades técnicas. Pese a todo, desde hace cinco años, han venido sumándose nuevos descubrimientos —entre ellos la secuenciación completa del genoma de varias cepas de *Chlamydia*—, que permiten empezar a sortear los obstáculos y pensar en desarrollar estrategias de prevención inéditas.

Lesiones silenciosas

Una de las principales barreras que se alzan contra la producción de una vacuna se esconde en el carácter insidioso de la bacteria. Los microorganismos agentes del tétanos o el cólera empapan los tejidos con toxinas que dañan o matan células vulnerables. Las clamidias, en cambio, no induce ningún daño directo en los tejidos. Opta por desencadenar una intensa respuesta inflamatoria que se prolonga mientras queden bacterias en el organismo.

Paradójicamente, semejante forma de luchar contra la infección se vuelve contra el propio huésped: a largo plazo, produce lesiones irreversibles. Las vacunas previenen la enfermedad enseñando al sistema inmunitario a reaccionar con fuerza ante agentes patógenos específicos; en el caso de las clamidias, sin embargo, el componente inflamatorio asociado a tal respuesta comportaría más perjuicio que beneficio.

Lo mismo en el tracto genital, en los párpados o en cualquier otro tejido, la respuesta inflamatoria comienza cuando determinadas células del sistema inmunitario del huésped secretan citoquinas, pequeñas proteínas de señalización que atraen células de defensa adicionales al lugar de la infección. Células atraídas y citoquinas se

MINDY JONES


OJOS, PULMONES Y TRACTO GENITAL
son vulnerables a la infección por clamidias.

aprestan a amurallar la zona para impedir la proliferación de las bacterias. En la piel, este proceso origina los síntomas de la inflamación (rubor, tumefacción y calor). Al propio tiempo, las citoquinas inflamatorias estimulan la fibrosis, respuesta reparadora que conduce a la cicatrización.

En el tracto genital, la inflamación inicial pasa inadvertida. Entre el 85 y el 90 por ciento de los tres millones y medio de estadounidenses que las clamidias infectan cada año por transmisión sexual no presenta síntomas. En los varones, la inflamación afecta al pene; podrían, pues, notar una pequeña molestia en la micción. Las mujeres no suelen apreciar ninguna alteración mientras las bacterias ascienden por el tracto genital hasta las trompas de Falopio. Al carecer de una consciencia del problema, los portadores se convierten, sin saberlo, en transmisores de las bacterias. Puede incluso que una mujer no sepa que está infectada hasta que, al intentar quedarse embarazada y no lograrlo, le diagnostiquen esterilidad. En otros casos, la persistencia de la inflamación y la cicatrización de las trompas de Falopio causan dolor pélvico crónico o aumentan la posibilidad de embarazos ectópicos o tubáricos, la principal causa de muerte en el primer trimestre de embarazo en los Estados Unidos.

La inflamación de los párpados, en cambio, se percibe enseguida. Se calcula que afecta a unos 150 millones de personas en los países en vías de desarrollo de clima cálido. En una población carente de medios eficaces de tratamiento y falta de agua para la higiene de manos y cara, las moscas y el jején transmiten sin obstáculo las bacterias. (El tracoma no se da en los EE.UU. ni en Europa occidental, que disfrutan de sistemas de salud pública.) Cuando las infecciones producen cicatrices en el párpado superior repetidas veces durante varios años, el párpado puede evertirse, de forma que las pestañas lesionen la córnea. Si no se detecta a tiempo, la alteración corneal causa ceguera, decenios después de contraer la infección.

Si la mayoría de los efectos producidos por las clamidias responden a la inflamación, las futuras vacunas deberán cumplir un requisito: no inducir una reacción inflamatoria excesiva, sino regularla finamente, provocarla sólo en la medida en que ayude a los otros sistemas de defensa a eliminar la bacteria.

Al ocuparse de las infecciones causadas por clamidias y otros patógenos, muchos estudios se centran en los factores desencadenantes de la secreción de citoquinas inflamatorias o en los factores que frenan la respuesta inflamatoria una vez la infección ha desaparecido. En los últimos años, se han descubierto micromoléculas que, en condiciones normales, estimulan o inhiben estas respuestas. El próximo paso consistirá en desarrollar compuestos capaces de regular la actividad de dichas moléculas; podrían utilizarse para una inhibición artificial de la inflamación, tras la administración de un antibiótico contra el microorganismo.

Enfermedad latente

Además de causar inflamación, las clamidias encierran otras propiedades que impiden el desarrollo de una vacuna. Quien ha pasado las paperas o el sarampión, o se ha vacunado contra estas enfermedades, queda inmunizado de por vida. No así con la clamidia. El organismo no elimina la bacteria con facilidad; la inmunidad natural que sigue al ataque de los microorganismos se mantiene sólo durante unos seis meses. Una infección en apariencia curada puede rebrotar unos meses o años más tarde, cuando apenas queda protección frente a nuevos brotes. Por tanto, una vacuna que remedara la respuesta natural del organismo contra la infección tampoco resultaría eficaz: no conferiría protección a largo plazo. En esencia, la vacuna debería aumentar la potencia del sistema defensivo, sin provocar una inflamación excesiva.

Una de las formas en que las vacunas o el sistema inmunitario protegen frente a futuras infecciones consiste en inducir la producción de linfocitos B de memoria, específicos del invasor en cuestión. Estas células inmunitarias realizan una tarea de vigilancia durante toda la vida del organismo, prestas a secretar anticuerpos que se adhieren a cualquier nuevo ejemplar del invasor y lo marcan para que sea destruido antes de que infecte células sanas. Los anticuerpos resultan eficaces contra varios agentes patógenos, sobre todo contra las bacterias extracelulares. Las atacan antes de que entren en la célula o cuando las copias recién ensambladas viajan de una célula a otra. Cuando se enfrenta a las clamidias, en cambio, el sistema de linfocitos B pierde eficacia; las bacterias medran en el interior celular y aquí no pueden alcanzarlas los anticuerpos circulantes.

Para evitar que las clamidias permanezcan latentes en las células y luego vuelvan a proliferar, la futura vacuna debería activar el brazo celular del sistema inmunitario, amén de provocar el ataque con anticuerpos. Este brazo, indispensable para erradicar los virus —que viven también en el interior de las células—, se sirve de células T asesinas y coadyuvantes, así como de células carroñeras o macrófagos, para eliminar a los invasores. Pero, por desgracia, semejante trío de células inmunitarias tampoco acaba con las clamidias, lo que permite que las células infectadas sobrevivan y se conviertan en fábricas productoras de bacterias.

Desarrollar una vacuna que despierte una respuesta celular superior en eficacia a la que organiza el propio

Resumen/Epidemia silenciosa y desatendida

- Las clamidias atacan de múltiples formas. Las infecciones no tratadas han causado ceguera a más de seis millones de personas en todo el mundo, dejan estériles a más de 10.000 mujeres cada año en los EE.UU. y son las responsables del 10 por ciento de los casos de neumonía en los países industrializados.
- La mayoría de las personas afectadas por clamidias no reciben tratamiento con antibióticos hasta que el daño es irreversible, bien porque no se les detecta la enfermedad a tiempo, bien porque no tienen acceso a una higiene o a una atención sanitaria adecuadas.
- Las campañas de educación sexual o las mejoras higiénicas ayudarán a reducir la proliferación de la bacteria. Para erradicar la epidemia, habría que disponer de vacunas y otras medidas preventivas.

ENFERMEDADES CAUSADAS POR LAS CLAMIDIAS

ESPECIE	ENFERMEDAD	DISTRIBUCION	FORMA DE TRANSMISION	NUMERO DE AFECTADOS
C. pneumoniae	Neumonía, posiblemente aterosclerosis	Mundial	Inhalación de la bacteria mediante los aerosoles que una persona infectada produce al estornudar	Causa alrededor del 10 por ciento de los casos de neumonía en los países desarrollados
C. psittaci	Psitacosis, infección pulmonar semejante a la gripe que causa inflamación del hígado, del corazón y del cerebro	Mundial	Inhalación de la bacteria mediante aerosoles o el polvo; picadura o contacto con el plumaje o los tejidos de un ave infectada	Común en aves salvajes y domésticas; rara pero potencialmente letal cuando se transmite al hombre
C. trachomatis (Cepas distintas producen alteraciones diferentes)	Tracoma, dolorosa infección ocular que empieza como una conjuntivitis y produce cicatrices corneales y, posiblemente, ceguera	Sudeste asiático, América del Sur, India, Oriente Medio, Africa	Contacto directo con secreciones corporales de personas infectadas o contacto con moscas vectores o ropas contaminadas con dichas secreciones	Más de 500 millones de personas en todo el mundo padecen tracoma; entre siete y nueve millones se han quedado ciegas a consecuencia de esta enfermedad. Muy rara en zonas con una higiene adecuada
C. trachomatis	Enfermedad de transmisión sexual (ETS) del tracto genital adulto; produce conjuntivitis y neumonía en los recién nacidos	Mundial	Contacto sexual; los recién nacidos adquieren la bacteria de su madre infectada cuando, al nacer, atraviesan el canal del parto	Entre 50 y 100 millones de nuevas infecciones de ETS se producen cada año en el mundo
C. trachomatis	*Lymphogranuloma venereum,* una ETS de los ganglios linfáticos de la zona genital	Asia, Africa, América del Sur, América Central	Contacto sexual	La incidencia global se desconoce

organismo constituye casi una utopía. Las vacunas existentes suelen provocar una respuesta humoral específica (anticuerpos); de ahí a activar una inmunidad celular contra enfermedades infecciosas media un largo trecho. Además, ello entraña especial dificultad en el caso de las clamidias, que saben cómo eludir el brazo celular del sistema inmunitario.

Evasión y camuflaje

Las clamidias comparten con determinadas bacterias patógenas la función siguiente: promueven que las células epiteliales —en su caso, las que tapizan el tracto genital, párpados o pulmones— las absorban en el interior de una vesícula o vacuola de membrana. En condiciones normales, la célula sana destruye los patógenos interiorizados fusionando las vacuolas con lisosomas, estructuras celulares que contienen enzimas que digieren proteínas, lípidos y ADN. Luego presenta los fragmentos troceados en la superficie, en las proteínas del complejo mayor de histocompatibilidad (CMH). Las células T asesinas y coadyuvantes, que circulan continuamente por todo el cuerpo, se unen entonces a las moléculas del CMH que presentan fragmentos de proteínas extrañas. Si una célula T recibe a la vez otras señales de alteración, deducirá que la célula presentadora de antígeno está infectada y dirigirá un ataque contra ella.

Pero las clamidias consiguen que las vacuolas en las que se han instalado eludan los lisosomas; ello les permite proliferar libremente, aisladas del resto de la célula infectada. Si los lisosomas no consiguen hacerse con fragmentos de la bacteria para presentarlos en el CMH, las patrullas de células T no reconocerán a la célula infectada. El comprender cómo las bacterias logran desarrollarse y escapar a los lisosomas podría sugerir nuevas formas de impedir o detener la infección. La secuenciación del genoma de *Chlamydia* y otros hallazgos recientes permiten encarrilar las investigaciones.

El genoma codifica las proteínas que un organismo sintetiza; éstas, a su vez, se encargan, en buena medida, de las funciones celulares. Por tanto, la secuencia de un gen constituye un buen indicador de cómo opera un organismo. A partir de las similitudes génicas halladas entre *Chlamydia* y *Salmonella typhimurium* —bacteria de mayor tamaño tristemente famosa por causar intoxicaciones alimentarias—, Ru-ching Hsia y uno de nosotros (Bavoil), de la Universidad de Maryland, en colaboración con otros expertos han descubierto un elemento de la mayor importancia: las clamidias cuentan con todo lo necesario para formar un aparato secretor de tipo III, una proyección versátil en forma de aguja que atraviesa la membrana de la vacuola de internalización; opera como un conducto entre la clamidia y el citoplasma de la célula huésped.

Merced a esa conexión, las clamidias pueden inyectar en la membrana externa de la vacuola proteínas que bloquean la actividad de los lisosomas. Además, se ha observado que las clamidias sustraen lípidos (señalados con marcadores fluorescentes en los experimentos) del aparato de Golgi y otros orgánulos celulares para recomponer la membrana de la vacuola.

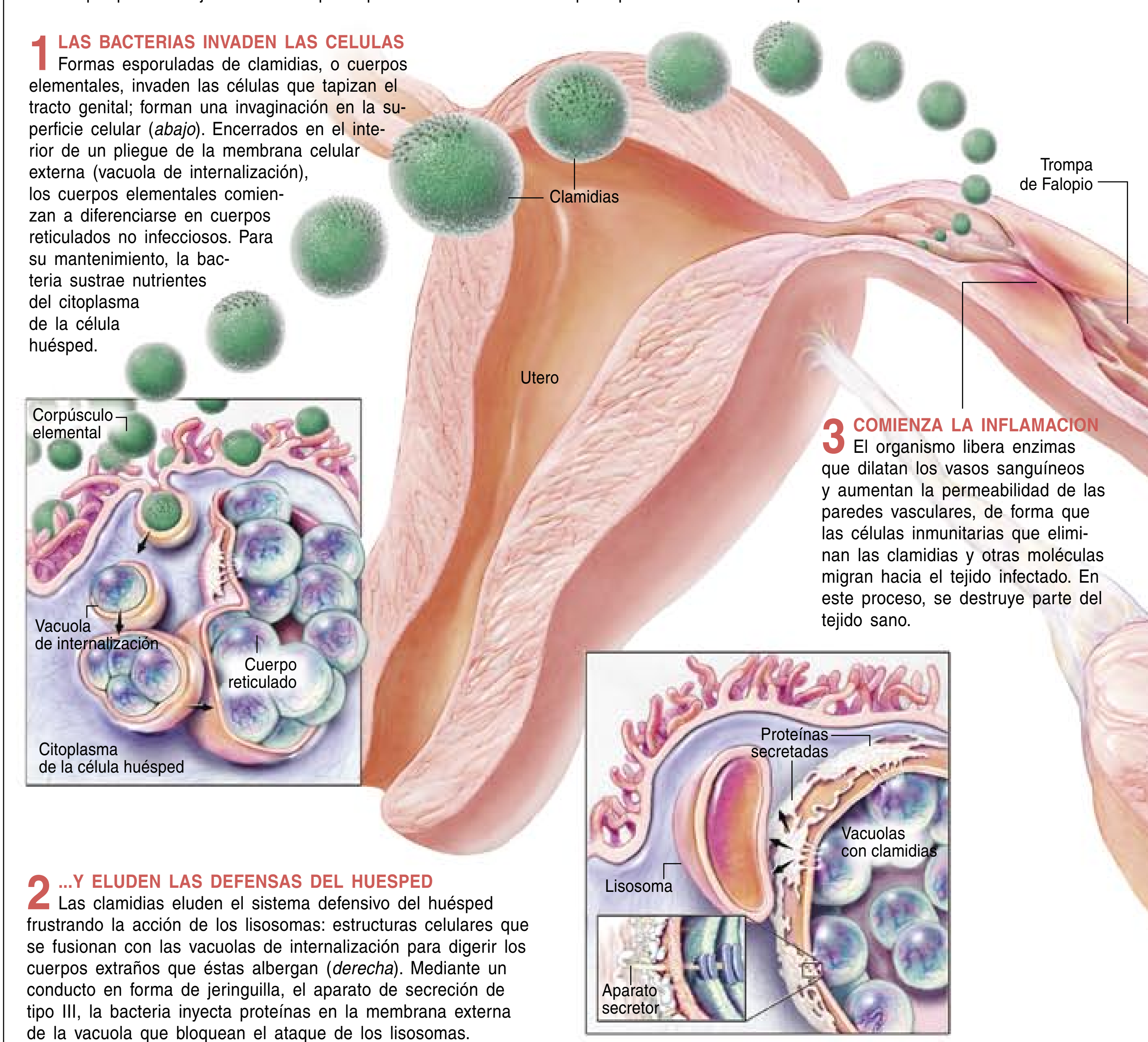
En general, la membrana de una vacuola de internalización consta de

FUENTE: www.med.sc.edu:85/mayer/chlamyd.htm

EL ATAQUE SIGILOSO DE LAS CLAMIDIAS

Las clamidias transmitidas por contacto sexual pasan inadvertidas para la mayoría de sus víctimas hasta que el daño es irreversible. En el peor de los casos, la infección de las trompas de Falopio produce tejido cicatricial que impide al óvulo fecundado llegar al útero (*figura principal*), dando lugar a un embarazo tubárico (ectópico) de pronóstico grave. Nuevos hallazgos sobre los mecanismos de supervivencia de las bacterias (*insertos*) quizá permitan evitar su ataque insidioso.

1 LAS BACTERIAS INVADEN LAS CELULAS
Formas esporuladas de clamidias, o cuerpos elementales, invaden las células que tapizan el tracto genital; forman una invaginación en la superficie celular (*abajo*). Encerrados en el interior de un pliegue de la membrana celular externa (vacuola de internalización), los cuerpos elementales comienzan a diferenciarse en cuerpos reticulados no infecciosos. Para su mantenimiento, la bacteria sustrae nutrientes del citoplasma de la célula huésped.



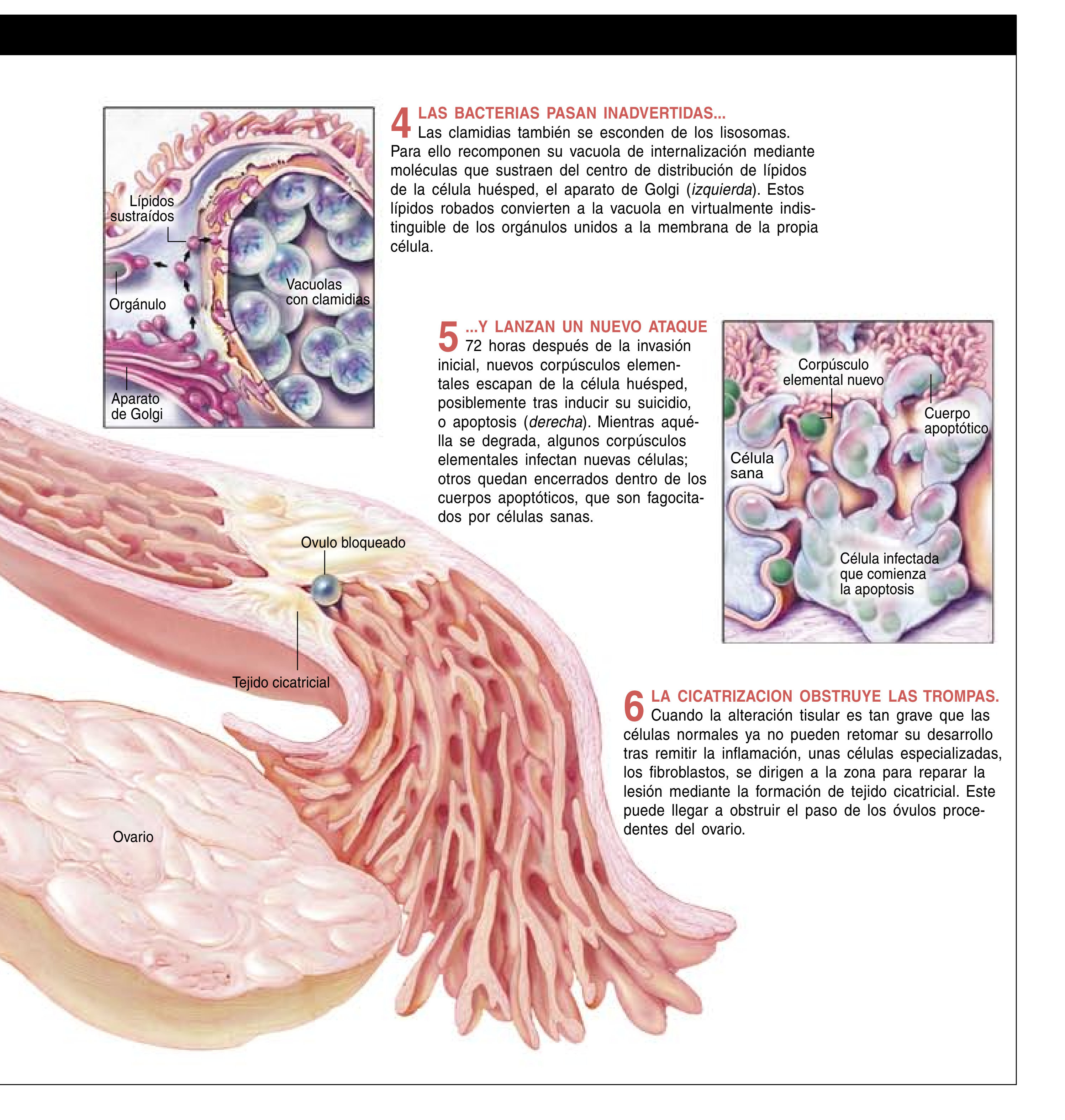
3 COMIENZA LA INFLAMACION
El organismo libera enzimas que dilatan los vasos sanguíneos y aumentan la permeabilidad de las paredes vasculares, de forma que las células inmunitarias que eliminan las clamidias y otras moléculas migran hacia el tejido infectado. En este proceso, se destruye parte del tejido sano.

2 ...Y ELUDEN LAS DEFENSAS DEL HUESPED
Las clamidias eluden el sistema defensivo del huésped frustrando la acción de los lisosomas: estructuras celulares que se fusionan con las vacuolas de internalización para digerir los cuerpos extraños que éstas albergan (*derecha*). Mediante un conducto en forma de jeringuilla, el aparato de secreción de tipo III, la bacteria inyecta proteínas en la membrana externa de la vacuola que bloquean el ataque de los lisosomas.

ANDREW SWIFT

moléculas fabricadas por el patógeno que alberga en su interior; estas moléculas extrañas delatan la presencia del intruso, que la célula marca de inmediato para que los lisosomas lo destruyan. Las clamidias, en cambio, recomponen la membrana de su vacuola de internalización con lípidos de la célula huésped: ello convierte a las vacuolas en indistinguibles del resto de orgánulos celulares y resultan, por tanto, invisibles para los lisosomas.

Si se identificaran las proteínas secretadas por las bacterias para camuflar las vacuolas, podrían desarrollarse dos tipos de tratamientos preventivos. Uno se basaría en un fármaco que obstaculizara la actividad de dichas proteínas de suerte tal, que la vacuola se viera forzada a fusionarse con los lisosomas; así se activaría un ataque inmunitario justo después de que las clamidias invadieran la célula. Otro fármaco podría inutilizar el mecanismo empleado por la bacteria para sustraer



4 LAS BACTERIAS PASAN INADVERTIDAS... Las clamidias también se esconden de los lisosomas. Para ello recomponen su vacuola de internalización mediante moléculas que sustraen del centro de distribución de lípidos de la célula huésped, el aparato de Golgi (*izquierda*). Estos lípidos robados convierten a la vacuola en virtualmente indistinguible de los orgánulos unidos a la membrana de la propia célula.

5 ...Y LANZAN UN NUEVO ATAQUE 72 horas después de la invasión inicial, nuevos corpúsculos elementales escapan de la célula huésped, posiblemente tras inducir su suicidio, o apoptosis (*derecha*). Mientras aquélla se degrada, algunos corpúsculos elementales infectan nuevas células; otros quedan encerrados dentro de los cuerpos apoptóticos, que son fagocitados por células sanas.

6 LA CICATRIZACION OBSTRUYE LAS TROMPAS. Cuando la alteración tisular es tan grave que las células normales ya no pueden retomar su desarrollo tras remitir la inflamación, unas células especializadas, los fibroblastos, se dirigen a la zona para reparar la lesión mediante la formación de tejido cicatricial. Este puede llegar a obstruir el paso de los óvulos procedentes del ovario.

lípidos de la célula huésped, anulando su capacidad para camuflarse. Los medicamentos en cuestión podrían incorporarse en microbicidas de uso tópico para combatir las clamidias de transmisión sexual.

Algunas de las proteínas mencionadas y otras exclusivas de las bacterias (no sintetizadas por las células humanas) quizá resulten ingredientes útiles para la fabricación de vacunas. Las recientes secuenciaciones genómicas deberían facilitar la identificación de buenos candidatos.

Tendencias suicidas

Nuevos hallazgos acerca de la función de las células T parecen abrir nuevos caminos terapéuticos. Las células T asesinas destruyen las células infectadas por la vía regular de la inducción de la apoptosis. Durante ese suicidio celular, la célula recurre a sus propias enzimas para lisar proteínas y ADN de sí misma. Se sabe también que las células inmunitarias —incluidas las células T y los ma-

crófagos— estimulan la producción de citoquinas que ayudan a detener las bacterias y disparan la respuesta inflamatoria que impide su proliferación. Una de las citoquinas que realiza ambas funciones es el factor de necrosis tumoral alfa (FNT-alfa). Se ha demostrado, sin embargo, que algunas células infectadas sobreviven a pesar de ser tratadas con FNT-alfa y otras citoquinas inductoras de la apoptosis, lo que lleva a infecciones persistentes. Pero el organismo no se rinde con facilidad. Las citoquinas continúan estimulando una inflamación crónica en un esfuerzo por refrenar la infección, aun cuando no logren acabar con ella del todo.

Ahora bien, ni siquiera las células infectadas viven eternamente. Parece que las clamidias han desarrollado su propia estrategia para provocar la muerte de la célula huésped y asegurarse así su propia longevidad. (La célula huésped debe perecer antes de que la bacteria infecte a otras células.) Y, según descubrió Jean-Luc Perfettini mientras realizaba el doctorado con uno de nosotros (Ojcius) en el Instituto Pasteur de París, las clamidias matan y abandonan las células infectadas de suerte tal, que recortan la capacidad del sistema inmunitario del huésped para detectar cualquier peligro; con ello, la infección puede propagarse sin ser descubierta.

Entender esta última fase del ciclo biológico de la bacteria requerirá ulteriores investigaciones sobre las proteínas implicadas en la inducción de la apoptosis y en la protección continuada de las células infectadas ante las señales suicidas. Parece que esta última vía podría fructificar en el desarrollo de una vacuna. Si las células infectadas adquirieran mayor sensibilidad a la apoptosis, sería posible eliminar las bacterias que permanecen latentes durante largos períodos de tiempo, así como disminuir los efectos duraderos de la infección crónica.

Múltiples vías de ataque

A pesar de los descubrimientos antes mencionados, no será fácil obtener una vacuna óptima contra la clamidia. Deberá activar el brazo humoral (anticuerpos) y el brazo celular (células T) del sistema inmunitario con mayor eficacia que el propio organismo, a la vez que limitar la inflamación. En el caso de las enfermedades de transmisión sexual originadas por clamidias, la vacuna deberá asegurar la permanencia en el tracto genital de linfocitos de memoria, prestos a combatir la infección en cualquier momento. Estas células de memoria, que no se producen *in situ*, tienden a desalojar la zona, dejando al individuo a merced de una nueva infección, tras un breve período de inmunidad.

Las mujeres padecen los efectos más duraderos de la infección geni-

Las clamidias y las enfermedades cardiovasculares

Resfriados, bronquitis y neumonías quizá no sean las únicas enfermedades que pueda contraer quien haya inhalado una especie aérea de *Chlamydia*. Hallazgos recientes sugieren que las infecciones por *C. pneumoniae* intervendrían también en trastornos cardiovasculares. De ser así, los antibióticos podrían indicarse para combatir la infección y la cardiopatía.

La aterosclerosis, el estrechamiento arterial que desemboca en infartos de miocardio y accidentes cerebrovasculares, causa alrededor de la mitad de todas las muertes en los adultos del mundo occidental. Sin embargo, los factores de riesgo tradicionales —hipercolesterolemia y tabaquismo— están presentes sólo en la mitad de los casos. En cuanto a las causas del cincuenta por ciento restante, los expertos empiezan a pensar en las infecciones, puesto que se ha comprobado que la inflamación —respuesta inmunitaria generalizada contra cualquier elemento percibido como invasor— subyace también en la formación y la rotura de los depósitos lipídicos que constriñen las arterias coronarias [*véase* "Una nueva teoría sobre la aterosclerosis", por Peter Libby; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio, 2002].

Tras descubrirse que se trataba de una especie independiente de clamidia en 1983, *C. pneumoniae* se convirtió en la primera sospechosa en razón de su ubicuidad: más del 60 por ciento de los adultos de todo el mundo presentan anticuerpos contra ella (señal de haber contraído la infección). La hipótesis fue avalada en 1988 cuando un grupo de médicos finlandeses hallaron una correlación positiva entre la presencia de estos anticuerpos y el riesgo de desarrollar aterosclerosis. Cinco años después, la bacteria se identificaba en arterias humanas obstruidas. Desde entonces, el Instituto Nacional de la Salud, la Asociación Norteamericana del Corazón y otras organizaciones estadounidenses han invertido millones de dólares en estudiar la relación entre *C. pneumoniae* y esta enfermedad cardiovascular.

C. PNEUMONIAE (*flecha*) identificada en las arterias coronarias ateroscleróticas del 54 por ciento de los 272 pacientes examinados en un estudio publicado en 2000.

La investigación realizada con animales de experimentación a lo largo del último quinquenio ha aportado pruebas de dicha conexión. Así se ha demostrado en ratones que las clamidias viajan de los pulmones a otras partes del organismo en el interior de los leucocitos, las células blancas de la sangre responsables de la inflamación. Otros trabajos han demostrado que las infecciones por *C. pneumoniae* adelantan la aterosclerosis en ratones y en conejos, aceleración que se soslaya con la administración de antibióticos.

Estos resultados experimentales, si bien provisionales, fueron suficientes para justificar el inicio de una serie de ensayos clínicos en humanos. Cinco de ellos concluyeron que un tratamiento con antibióticos que durara entre uno y tres meses lograría frenar el avance de la aterosclerosis; en cambio, no confirmaron la capacidad de los antibióticos para prevenir alteraciones cardiacas graves. Otros dos ensayos, completados en 2004, evaluaron la eficacia de los tratamientos a largo plazo; cada uno de ellos contó con la participación de 4000 voluntarios, que recibieron antibióticos durante un período de entre uno y dos años. Los resultados, sin embargo, fueron negativos.

¿Existe realmente una conexión clara entre la infección por *C. pneumoniae* y la aterosclerosis? Carecemos de una respuesta sólida. En la enfermedad cardiaca intervienen múltiples factores.

DETENER A LAS CLAMIDIAS

La educación sexual y las mejoras higiénicas no pueden, por sí solas, erradicar las infecciones por clamidias. Para detener la proliferación de la bacteria se ha depositado la mayor esperanza en las vacunas y otros tratamientos preventivos. Ciertos descubrimientos recientes apuntan hacia nuevas vías para vencer a las clamidias o limitar el daño ocasionado por la excesiva respuesta inmunitaria que éstas provocan. Algunas de ellas se señalan a continuación.

Matar la bacteria en cuanto penetre en el organismo. Desarrollar un microbicida de uso tópico (un gel, una crema o una espuma) que pueda aplicarse por vía vaginal o rectal. Este tipo de productos se están ensayando en humanos para el tratamiento del sida, que infecta los mismos tejidos que las clamidias.

Desarmar la capacidad invasora celular de la bacteria. Desarrollar una vacuna que aumente la respuesta de los anticuerpos del huésped. La administración de antiinflamatorios tras una vacuna o un tratamiento con antibióticos disminuiría el daño tisular. Todavía no se ha logrado con éxito en ensayos con animales.

Inhibir el crecimiento bacteriano en las células infectadas. Entorpecer la actividad de las proteínas que la bacteria utiliza para sustraer los lípidos y otros nutrientes de la célula huésped. Una vez conocidas tales proteínas —todavía no se han identificado—, se inmovilizarían mediante una vacuna especialmente diseñada para ello.

Promover la destrucción intracelular de la bacteria. Inutilizar el aparato de secreción de tipo III de la bacteria. De él se sirve para liberar proteínas que bloquean la actividad de los lisosomas de la célula huésped, agentes encargados de trocear los cuerpos extraños.

En los ensayos, bacterias con aparatos de secreción prácticamente idénticos, en las que se habían silenciado los genes que codifican para dicho aparato, no causaron síntomas de infección. A tenor de estos resultados, fármacos que bloqueen las proteínas codificadas por estos genes en *Chlamydia* podrían resultar eficaces.

Dejar en suspenso la capacidad proliferativa de la bacteria. Provocar el "suicidio" de las células infectadas antes que la bacteria tenga oportunidad de convertirse en una forma invasora de células sanas. Compuestos que inducen la muerte celular prematura en tumores se encuentran en fase de desarrollo; en teoría, los mismos fármacos actuarían contra las clamidias.

tal. La vacuna quizá debería protegerlas de la enfermedad más que de la infección *per se*. Para ello deberían vacunarse varones y mujeres. En este escenario, la vacuna produciría tan sólo los anticuerpos necesarios para reducir —no eliminar— la cantidad de bacterias transportadas por el varón. De este modo, si una mujer se expusiera a ser infectada por un varón a través de una relación sexual, las células de memoria inducidas por su inmunización viajarían por el tracto genital en la cantidad adecuada para matar a un pequeño número de microorganismos antes que se diseminaran por las trompas de Falopio.

En espera de la ansiada vacuna, podrían emplearse anticonceptivos portadores de fármacos anticlamídicos. Esos agentes servirían para bloquear las proteínas que las clamidias usan para unirse a las células del tracto genital o para degradar las proteínas bacterianas que promueven la supervivencia del microorganismo en el interior celular. En el caso de las infecciones oculares, sólo sería útil una vacuna que previniera la infección.

Mientras llegan medidas de prevención eficaces contra las clamidias, importa resaltar los buenos resultados de los tratamientos tradicionales con antibióticos, siempre que se disponga de acceso a los mismos. Y los últimos descubrimientos génicos apuntan que su eficacia proseguirá. En comparación con patógenos bacterianos de vida libre, que intercambian genes con facilidad, el genoma de *Chlamydia* ha permanecido prácticamente inalterado en el transcurso de millones de años. Semejante estabilidad génica implica que las clamidias no se prestan a adquirir genes de otras bacterias, ni siquiera los que confieren resistencia a los antibióticos.

No podemos olvidar que los antibióticos no reparan el daño tisular causado por la inflamación. Además, para obtener buenos resultados, deben administrarse lo antes posible. Por ello, es necesario ampliar la exploración de individuos con alto riesgo de contraer la infección. Se ha comprobado ya la fiabilidad de exploraciones urinarias no invasivas en varones y mujeres jóvenes sexualmente activos, sobre todo en institutos, centros de instrucción militar y correccionales de menores. Los responsables de la salud pública deberían aplicar estas medidas al propio tiempo que prosigue la búsqueda de vacunas eficaces.

Los autores

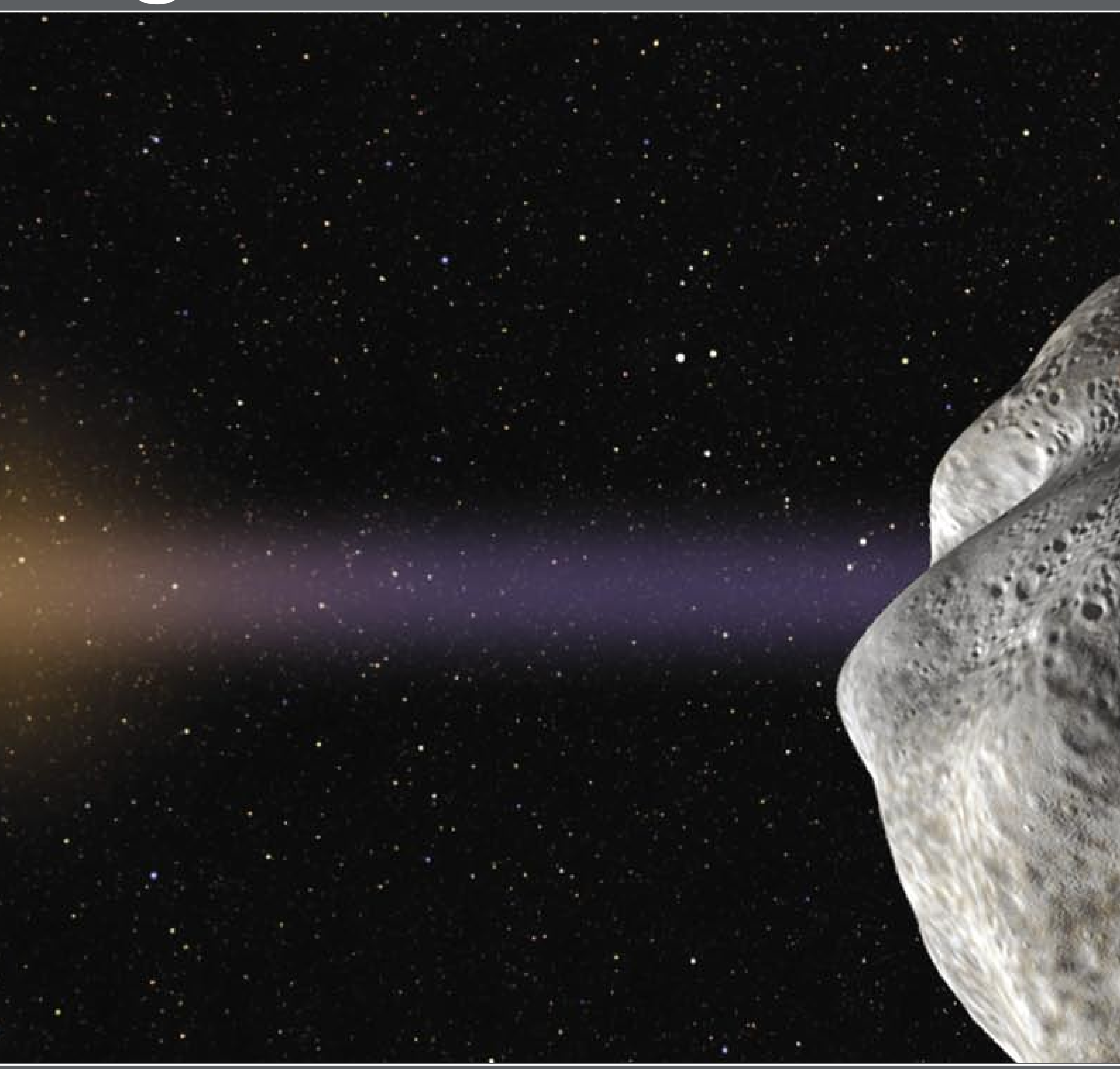
David M. Ojcius estudió durante doce años en Francia los aspectos celulares e inmunitarios de la infección; en 2004 se incorporó al claustro de la Universidad de California en Merced. **Toni Darville** es especialista en enfermedades infecciosas pediátricas en la Universidad de Medicina de Arkansas; desde 1994 trabaja en los aspectos inmunitarios de la infección por clamidias en ratones y cobayas. **Patrik M. Bavoil** enseña en la Universidad de Maryland en Baltimore; investiga las bases bioquímicas de la enfermedad.

Bibliografía complementaria

CHLAMYDIA PNEUMONIAE. AN INFECTIOUS RISK FACTOR FOR ATHEROSCLEROSIS? Lee Ann Campbell y Cho-cho Kuo en *Nature Reviews Microbiology*, vol. 2, n.º 1, páginas 23-32; enero 2004.

CHLAMYDIA AND APOPTOSIS: LIFE AND DEATH DECISIONS OF AN INTRACELLULAR PATHOGEN. Gerald I. Byrne y David M. Ojcius en *Nature Reviews Microbiology*, vol. 2, n.º 10, páginas 802-808; octubre 2004.

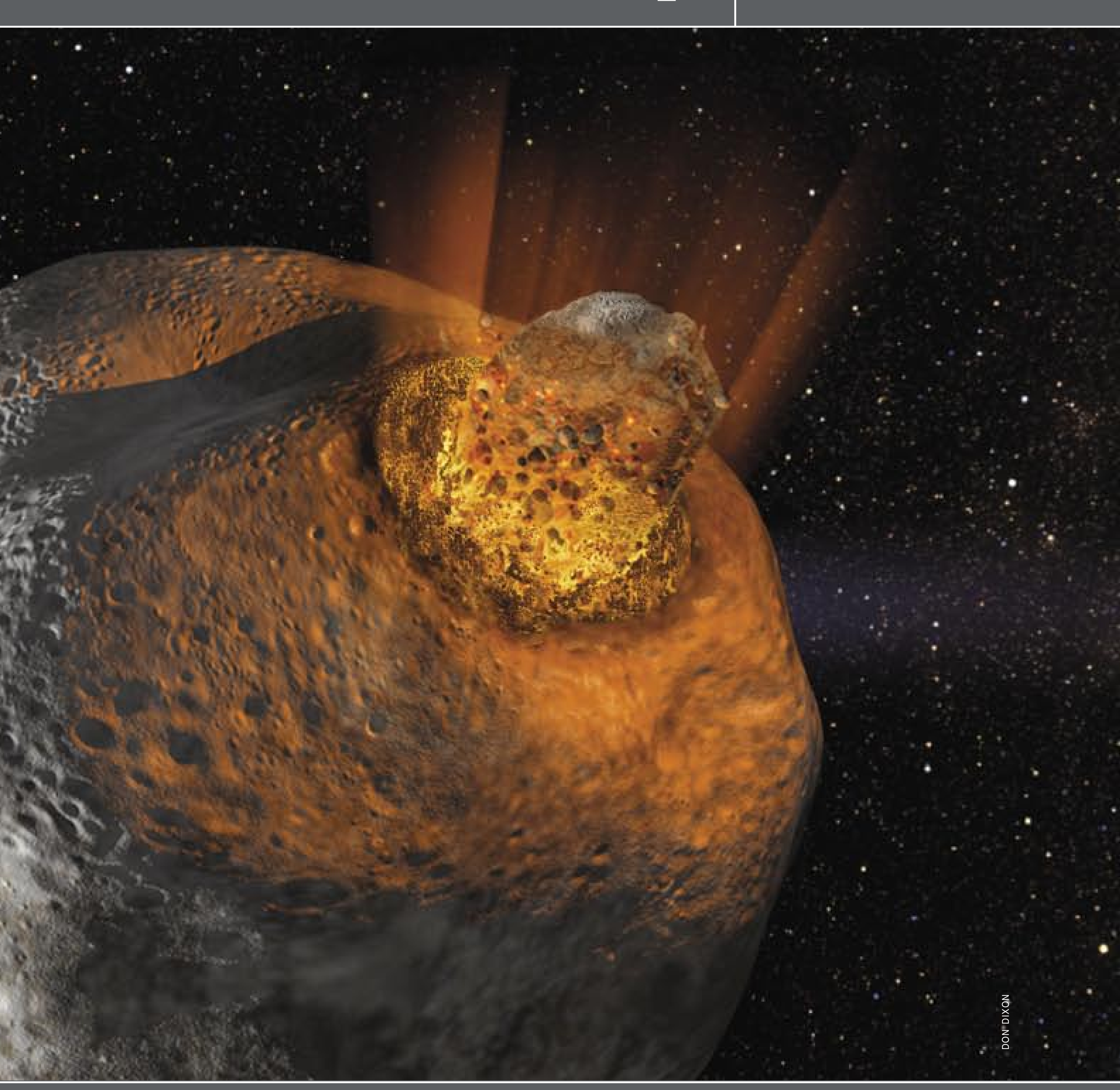
¿Qué calentó los



Las colisiones de asteroides durante los primeros momentos del sistema solar quizá constituyan

asteroides?

Alan E. Rubin



la razón de que muchos de estos cuerpos rocosos alcanzaran temperaturas elevadas

Los objetos de gran tamaño retienen el calor mejor que los pequeños. La mayor parte del calor interno de la Tierra procede de cuatro radioisótopos de vida media larga —potasio 40, torio 232, uranio 235 y uranio 238—, que generan energía durante miles de millones de años al desintegrarse en isótopos más estables. Gracias a su gran tamaño, unos 12.740 kilómetros de diámetro, la Tierra pierde calor con cierta lentitud, de ahí que presente todavía un núcleo fundido y erupciones volcánicas en la superficie. Los cuerpos menores, sin embargo, con una razón mayor entre superficie y volumen, se enfrían más deprisa al radiar calor al espacio. El tamaño de la Luna no es más que una cuarta parte del terrestre, por lo que pierde calor más deprisa. Como resultado, las grandes erupciones lunares de basalto, la roca volcánica más común, cesaron hace casi tres mil millones de años.

La pérdida de calor es aún más rápida en los pequeños asteroides rocosos del interior del sistema solar, sobre todo entre las órbitas de Marte y Júpiter. Vesta, el tercero en tamaño de los asteroides, tiene un diámetro de 516 kilómetros; en él, la razón entre superficie y volumen multiplica por 25 la de la Tierra. Pero nos presenta una paradoja: a pesar de su reducido tamaño, muestra signos de una actividad geológica pasada. Las observaciones espectroscópicas de la superficie de Vesta indican que tiene una capa de basalto volcánico; la conclusión es que el interior de este asteroide se fundió en alguna ocasión. El calentamiento no se debe a los radioisótopos de vida media larga; a partir de las concentraciones primordiales isotópicas y del ritmo esperado de pérdida de calor, los cálculos confirman que la desintegración radiactiva no pudo fundir Vesta, ni ningún otro asteroide. Ha de haber otra fuente; pero, ¿cuál? Esta pregunta ha perseguido a los planetólogos durante décadas.

En los últimos años, han ofrecido una posible respuesta las observaciones espaciales, muy en particular las de la misión astronáutica NEAR (del inglés "Near Earth Asteroid Rendezvous", encuentro con los asteroides próximos a la Tierra). Cuando NEAR se acercó al asteroide Matilde en 1997, las medidas del empuje gravitatorio que experimentó la nave evidenciaron la inesperada pequeñez de la masa del asteroide. De esa baja densidad se concluyó que Matilde consiste en una pila muy porosa de escombros, con brechas y huecos en su estructura. Este hallazgo puso en entredicho nuestras ideas acerca de la dinámica de los asteroides y apunta a la posibilidad de que las colisiones entre los cuerpos rocosos generen grandes cantidades de calor (aunque parece probable que Matilde no se haya fundido nunca). Aunque se trata de una hipótesis controvertida, cuenta a su favor con los nuevos estudios de meteoritos, los fragmentos de asteroide que llegan hasta la Tierra. Si se demuestra su validez, la teoría del calentamiento por colisión habría a la vez resuelto uno de los misterios astronómicos más persistentes y transformado nuestra visión de la historia primigenia del sistema solar.

Meteoritos tostados

Una de las herramientas clave para la investigación de los asteroides es la espectroscopía: se compara el espectro de la luz reflejada por los cuerpos rocosos con los espectros de la luz reflejada por rocas examinadas en el laboratorio. Los minerales absorben y reflejan la luz en longitudes de onda diferentes. El basalto absorbe mucho la luz justo más allá del borde rojo del espectro visible. Se ha recurrido a la espectroscopía para clasificar los asteroides. La región interna del cinturón de asteroides está poblada por asteroides de la clase S, un grupo mixto que contiene al parecer cuerpos que se fundieron alguna vez y cuerpos que nunca se han fundido. En las regiones más externas del cinturón —a distancias superiores a los 450 millones de kilómetros del Sol—, abundan sobre todo los asteroides de las clases C, P y D; todos parecen ser objetos primitivos que nunca se han fundido. Uno de los inconvenientes de la espectroscopía remota es que sólo examina la superficie de los cuerpos. En algunos casos, la capa polvorienta más externa de un asteroide no representa el material que hay bajo la corteza.

Otra herramienta es el análisis de los meteoritos procedentes del cinturón de asteroides. Estas rocas, arrancadas de los asteroides por impactos, emigran hacia órbitas que se cruzan con la de la Tierra, cuya gravedad los captura. (La inmensa mayoría de las decenas de miles de meteoritos catalogados en colecciones institucionales proceden del cinturón de asteroides; sólo 60 o 70 especímenes podrían haber sido expulsados de la Luna o de Marte). Los meteoritos más comunes son las condritas, que contienen muchas esferas pequeñas: los cóndrulos, que constan de minerales silicatados, sobre todo. Los cóndrulos miden un milímetro de diámetro o menos. Se formaron hace casi 4600 millones de años en la nebulosa solar —la nube de gas y polvo de la que surgió el sistema solar— y se convirtieron en los componentes principales de los asteroides cuando estos cuerpos rocosos empezaron a ensamblarse.

Se sabe que las condritas nunca se han fundido tras la formación de sus asteroides porque la fusión habría destruido los cóndrulos. No obstante, muchas condritas presentan indicios de haberse calentado hasta temperaturas por debajo del punto de fusión de los cóndrulos. En razón del grado de metamorfismo térmico o de alteración acuosa —cambios mineralógicos causados por el calor o por el

Resumen/Calor en los impactos de asteroides

- El estudio de los asteroides revela que, a pesar de su reducido tamaño, alcanzaron temperaturas elevadas durante los primeros momentos del sistema solar.
- Según los geoquímicos, la fuente de ese calentamiento pudo ser un radioisótopo del aluminio de vida media corta, pero los cálculos más recientes indican que la desintegración radiactiva no fue suficiente.
- Los impactos entre asteroides porosos proporcionaron un calor adicional. Hay indicios de que las colisiones de alta energía calentaron los asteroides recién formados.

agua— al que han estado sometidas desde su creación, las condritas se dividen en seis categorías. Las condritas de tipo 3 son las más primitivas; sus granos de mineral nunca se han recristalizado tras un calentamiento. Estas rocas presentan, además, proporciones elevadas de sustancias volátiles (gases nobles, agua) y numerosos granos presolares (partículas de polvo que se formaron hace mucho tiempo en las atmósferas externas de otras estrellas y han permanecido inalteradas a lo largo de la historia del sistema solar). Estas propiedades nos indican que las condritas de tipo 3 nunca se han calentado por encima de los 400 o 600 grados.

Aunque las condritas de tipo 3 no han sufrido altas temperaturas, muchas han pasado por alteraciones acuosas en sus asteroides de origen. El agua pudo provenir de cristales de hielo fundidos al calentarse las rocas por encima de 0 grados, o de la deshidratación de minerales silicatados que contenían agua y la perdieron a unos pocos cientos de grados. Las condritas de los tipos 1 y 2 difieren de las de la clase 3 sobre todo por haber experimentado alteraciones acuosas mayores; el agua ha oxidado buena parte el hierro y el níquel de esas rocas. La cantidad de agua (en peso) de los meteoritos ronda el once por ciento en las condritas de tipo 1, el nueve en las de tipo 2 y el dos por ciento, o menos, en las de tipo 3.

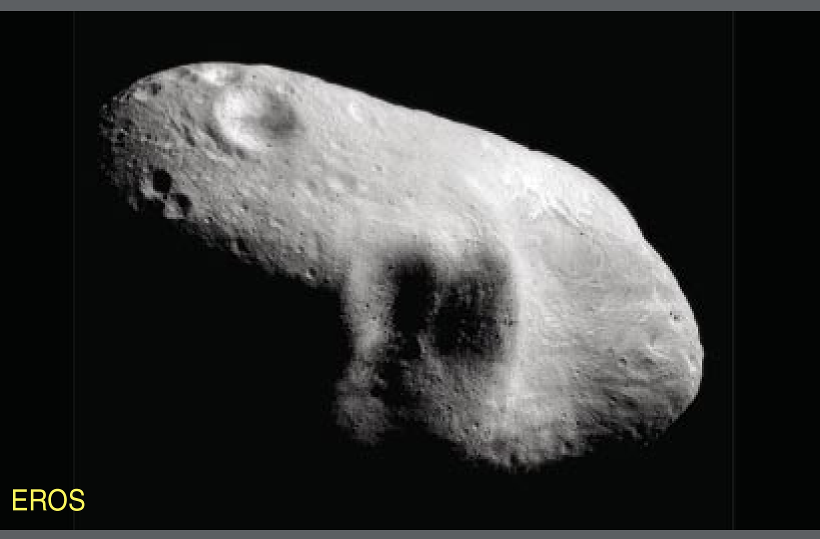
Las condritas de los tipos 4 a 6 presentan niveles crecientes de metamorfismo térmico. La recristalización generalizada ha hecho que los cóndrulos y los granos de minerales próximos en la matriz —el material en que se incluyen los cóndrulos— se mezclen unos con otros. Es más, el calentamiento ha destruido la mayoría de los granos presolares y mermado la cantidad de gases nobles y de agua. Estas condritas alcanzaron temperaturas de entre 600 y 950 grados.

Otros tipos de meteoritos presentan signos de fusión. Si un asteroide condrítico se funde por completo, los metales y los silicatos forman líquidos inmiscibles, que se separan de acuerdo con su densidad, como el agua y el aceite. El líquido denso de hierro y níquel se hunde en el interior del asteroide y cristaliza lentamente

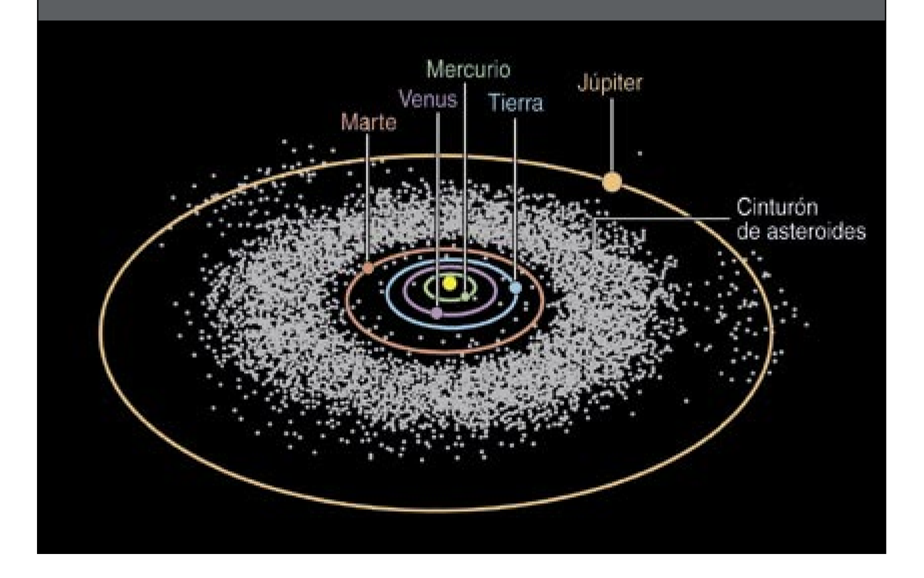
LOS ASTEROIDES: RELIQUIAS DEL ORIGEN DEL SISTEMA SOLAR

Los asteroides se formaron hace más de 4500 millones de años, la época en que empezaron a constituirse los cuerpos rocosos. En 1997 la nave NEAR se acercó al asteroide Matilde (*derecha*). Según sus mediciones, se trata de una pila porosa de escombros deformada por violentos impactos. En el año 2000, NEAR entró en órbita alrededor de Eros (*abajo*), un cuerpo menor que el anterior y denso, cubierto de cráteres.





La mayoría de los asteroides, incluido Matilde, se encuentra en un cinturón entre las órbitas de Marte y Júpiter. (Eros se halla en una órbita más próxima a la Tierra). Aunque en el diagrama el cinturón de asteroides parece muy poblado, los cuerpos de mayor tamaño están en realidad separados por millones de kilómetros.



NASA/NSSDC (*Mathilde y Eros*); JEN CHRISTIANSEN (*diagrama orbital*)

a medida que va enfriándose. Por encima del núcleo, los silicatos se endurecen en un manto pedregoso; la fusión parcial del manto produce basaltos que ascienden hacia la superficie para formar una corteza. El producto final constituye un "objeto diferenciado". Muchos meteoritos parecen proceder de asteroides como éstos. La mayoría de los meteoritos de hierro —los mayores fragmentos extraterrestres hallados en nuestro planeta— son pedazos de los núcleos de asteroides fundidos. Se piensa que muchos de los meteoritos de hierro y piedra proceden de la frontera entre el núcleo y el manto; se admite que otro grupo de meteoritos, los eucritos, salió, probablemente, de la corteza.

Más del 90 por ciento de los meteoritos que vienen de asteroides y cuya caída a nuestro planeta se ha detectado antes de que se los recogiese del suelo presentan indicios de fusión o de grandes metamorfismos; ejemplos de lo primero serían los meteoritos de hierro, los de hierro y piedra y los eucritos, en tanto que reflejarían metamorfismo las condritas de tipos 4, 5 y 6. Es obvio que los asteroides sufrieron altas temperaturas en alguna ocasión. Pero, ¿qué aumentó su temperatura hasta tal punto, si son demasiado pequeños para retener el calor procedente de los radioisótopos de vida media larga?

Calentamiento por aluminio

Hace 50 años, Harold Urey propuso una respuesta: la desintegración radiactiva del isótopo de vida media corta de aluminio 26 (^{26}Al) podría haber calentado los asteroides. Al contrario que el aluminio común, el aluminio 27 (^{27}Al), que tiene un neutrón más, el ^{26}Al es inestable; se desintegra en el isótopo magnesio 26 (^{26}Mg) liberando energía en el proceso. El ^{26}Al tiene una semivida (el tiempo en que se desintegra la mitad de una muestra) de 730.000 años, miles de veces más corta que las semividas de los radioisótopos de larga duración. Puesto que el ^{26}Al se desintegra tan pronto, cantidades reducidas de este isótopo aumentan notablemente la temperatura, incluso de los cuerpos pequeños, antes de que el calor se pierda en el espacio. Pero este calentamiento no es duradero; en unos pocos millones de años casi todo el ^{26}Al se ha convertido en ^{26}Mg.

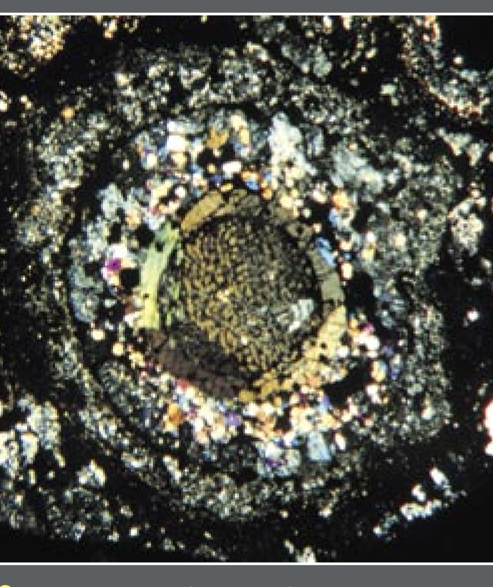
Se cree que el ^{26}Al presente en nuestro sistema solar se fabricó en las reacciones nucleares de otra estrella y lo dispersó una explosión de supernova, que inyectó el isótopo en la nebulosa solar hace unos 4600 millones de años. En el mismo planteamiento teórico se admite también que la onda de choque de esa supernova desencadenó el colapso gravitatorio de una nube de gas que daría lugar al Sol y los planetas. Un fenómeno de esa índole pudo haber distribuido el ^{26}Al por igual por toda la nebulosa, convirtiéndose en la fuente de calor de cuerpos rocosos que se ensamblaron a diferentes distancias del Sol. (O bien, algo de ^{26}Al pudo haberse formado al irradiar el Sol primitivo las partículas más cercanas a sí y desperdigarlas más tarde con vientos turbulentos.) Con una cantidad suficiente de ^{26}Al, algunos asteroides se habrían fundido poco después de su formación. En los meteoritos ensamblados después y, por tanto, con menores cantidades de ^{26}Al, el calentamiento habría creado una estructura de cebolla; el interior del asteroide se habría enfriado más despacio que el exterior y las rocas del núcleo sufrirían un metamorfismo más intenso (por ejemplo, las condritas 6). Las rocas cada vez menos metamórficas (las condritas de tipos 5, 4 y 3) residirían en capas concéntricas próximas a la superficie del asteroide.

Para probar esta hipótesis, se han buscado en los meteoritos proporciones anormalmente altas de ^{26}Mg, producto de la desintegración radiactiva del ^{26}Al. En particular, se rastrean los excesos de ^{26}Mg en los minerales meteoríticos que contienen mucho aluminio y poco magnesio. En estudios recientes, se han analizado minerales ricos en aluminio, como la anortita y la hibonita, con microsondas de iones. Estos instrumentos bombardean las muestras con haces iónicos enfocados sobre la superficie a fin de arrancarle iones secundarios, que se dirigen hacia un espectrómetro de masas donde se establece su composición.

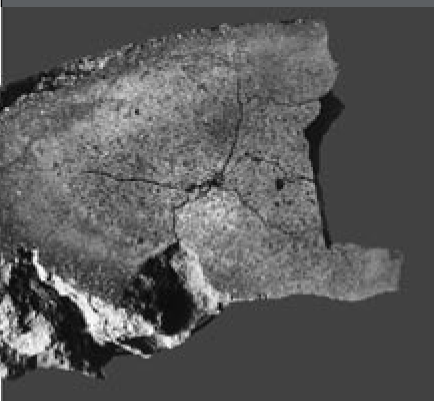
INSTITUCION SMITHSONIANA (*Colony*); ALAN E. RUBIN (*Allende y Kernouvé*)

LOS METEORITOS: FRAGMENTOS DE ASTEROIDE EN TIERRA

Podemos conocer la historia de los asteroides gracias a los meteoritos, rocas arrancadas de los asteroides y capturadas por la gravedad terrestre. Los meteoritos comunes son las condritas, que contienen una ingente cantidad de pequeñas esferas llamadas cóndrulos. Al seccionar la roca y estudiar al microscopio las estructuras cristalinas se descubren indicios de calentamientos e impactos.



Esta microfotografía de un cóndrulo del meteorito Allende, caído sobre México en 1969, presenta signos de calentamiento. Los anillos concéntricos sugieren que ha pasado al menos por tres episodios de fusión.



..., una condrita carbonácea de 3,9 kilogramos encontrada en un campo de algodón de Oklahoma en 1975.

Esas investigaciones han revelado la existencia de ^{26}Al en las inclusiones refractarias: pequeños ensamblajes de minerales, ricos en calcio y aluminio, sumergidos en los meteoritos condríticos junto a los cóndrulos. Los minerales de estos ensamblajes se forman a altas temperaturas, no menos de 1800 grados Celsius, por lo que las inclusiones refractarias deben de datar de los primerísimos tiempos del sistema solar, antes de que se enfriara la nebulosa solar. En la mayoría de las inclusiones analizadas, se ha determinado que la proporción de ^{26}Al en el momento de la formación —cantidad expresada por la razón entre el ^{26}Al y el isótopo más abundante, ^{27}Al— era $4{,}5 \times 10^{-5}$. A ese valor se le denomina "razón canónica".

Con tamaña concentración de ^{26}Al pudo haberse dado un calentamiento considerable. La razón canónica es la misma en las inclusiones halladas en toda las clases de condritas. (Amén de clasificarse según el tipo metamórfico, las condritas se dividen en tres grandes tipos de acuerdo con su composición química: comunes, carbonáceas y enstatitas.) A pesar de ello, las inclusiones apenas representan una pequeña fracción del aluminio existente en las condritas; hay más aluminio en los cóndrulos, que llegan a sumar del 30 al 90 por ciento del aluminio de la mayoría de las condritas. Por tanto, los cóndrulos deberían haber participado mucho más en el calentamiento radioisotópico que las inclusiones refractarias.

En el año 2000, Noriko Kita, del Servicio de Inspección Geológica de Japón, y sus colaboradores examinaron los cóndrulos de las condritas corrientes —una clase formada por los tres grupos más comunes de condritas, llamados H, L y LL— y encontraron que la razón isotópica entre el ^{26}Al y el ^{27}Al en el momento de la formación de los cóndrulos era sólo de un $7{,}4 \times 10^{-6}$, es decir, una sexta parte de la razón canónica. Conocido el ritmo de desintegración del ^{26}Al, esta razón isotópica inicial apunta a que los cóndrulos se formaron entre uno y dos millones de años después de las inclusiones refractarias (suponiendo que el radioisótopo estaba homogéneamente distribuido por el sistema solar primigenio). Ya que los asteroides condríticos son posteriores a los cóndrulos, la razón isotópica inicial de los cóndrulos impone un límite superior a la cantidad de ^{26}Al disponible para calentar los cuerpos rocosos.

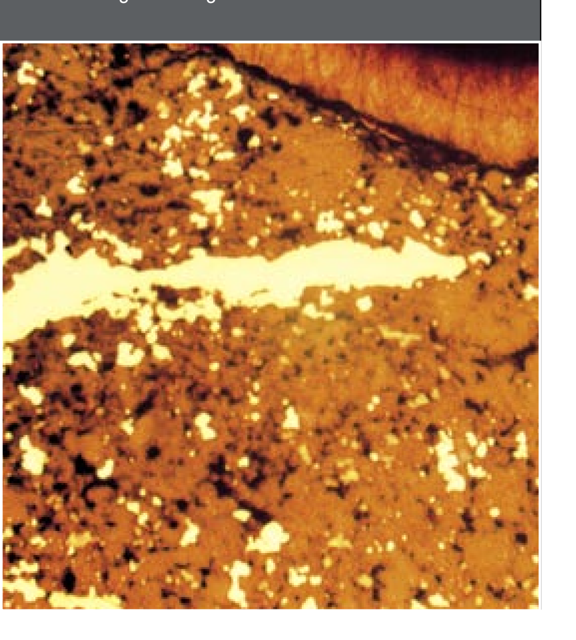
No parece probable que esta cantidad bastase para causar todo el calentamiento observado en los meteoritos. Los modelos térmicos muestran que aun cuando los asteroides se hubiesen formado inmediatamente después de la creación de los cóndrulos, el calentamiento debido al ^{26}Al habría aumentado la temperatura del interior de los asteroides de las condritas comunes hasta los 1100 grados, como mucho; a esa temperatura se derriten los metales y los sulfuros, pero resulta insuficiente para fundir los silicatos y diferenciar un asteroide. La eficiencia del calentamiento radioisotópico es menor en los asteroides progenitores de las condritas carbonáceas; en el análisis de los cóndrulos de uno de estos meteoritos (realizado por Takuya Kunihiro y sus colaboradores de la Universidad de California en Los Angeles, entre los que me cuento), encontramos una razón inicial promedio de ^{26}Al y ^{27}Al de $3{,}8 \times 10^{-6}$, alrededor de la mitad de la vista en los cóndrulos de las condritas comunes. Aun con varias suposiciones generosas, determinamos que la temperatura máxima alcanzada en asteroides de condritas carbonáceas con diámetros de 80 kilómetros o mayores no habría pasado de 670 grados, muy pequeña para fundir algo.

Para orillar ese problema, los defensores del calentamiento por ^{26}Al presuponen que algunos cóndrulos se formaron antes en la historia del sistema solar, quizás en un tiempo más cercano al momento en que los minerales de las inclusiones refractarias se condensaron en la nebulosa solar y, por lo tanto, presentaban razones isotópicas mayores. Según esta hipótesis, nunca se encontrarán datos de tales cóndrulos tempranos porque los destruyó la fusión de los asteroides condríticos a los que se incorporaron. Aunque no pueda refutarse tal hipótesis, no parece muy probable. Si esos cóndrulos ricos en ^{26}Al existieron alguna vez, debieron también de formarse algo después cóndrulos intermedios, con una razón isotópica más moderada, no tan alta como para destruir los cóndrulos, si bien mayor que las razones observadas hasta ahora. Aunque estos hipotéticos cóndrulos deberían aún estar presentes en nuestro sistema solar, no se ha hallado ninguno todavía. (No obstante, la búsqueda acaba de empezar.)

Algunas alternativas

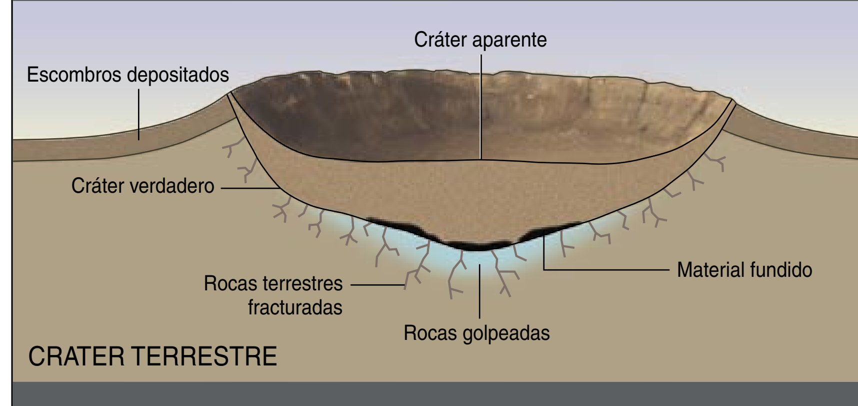
Ya que el grado de calentamiento del ^{26}Al podría no haber llegado a fundir los asteroides, es prudente pensar en otras fuentes posibles de calor. Una alternativa considerada con frecuencia es el radioisótopo hierro 60 (^{60}Fe), con una corta semivida de millón y medio de años. Alexander Shukolyukov y Gunter Lugmair de la Universidad de California en San Diego han encontrado su producto de desintegración, el níquel 60 (^{60}Ni), en algunos eucritos; en unas pocas condritas lo hallaron también Shogo Tachibana y Gary Huss, entonces en la Universidad Estatal de Arizona. Con todo, se deduce de los datos que la proporción relativa inicial de ^{60}Fe fue pequeña, del orden de 3×10^{-7}. Kunihiro y sus colaboradores estimaron que la desintegración del ^{60}Fe

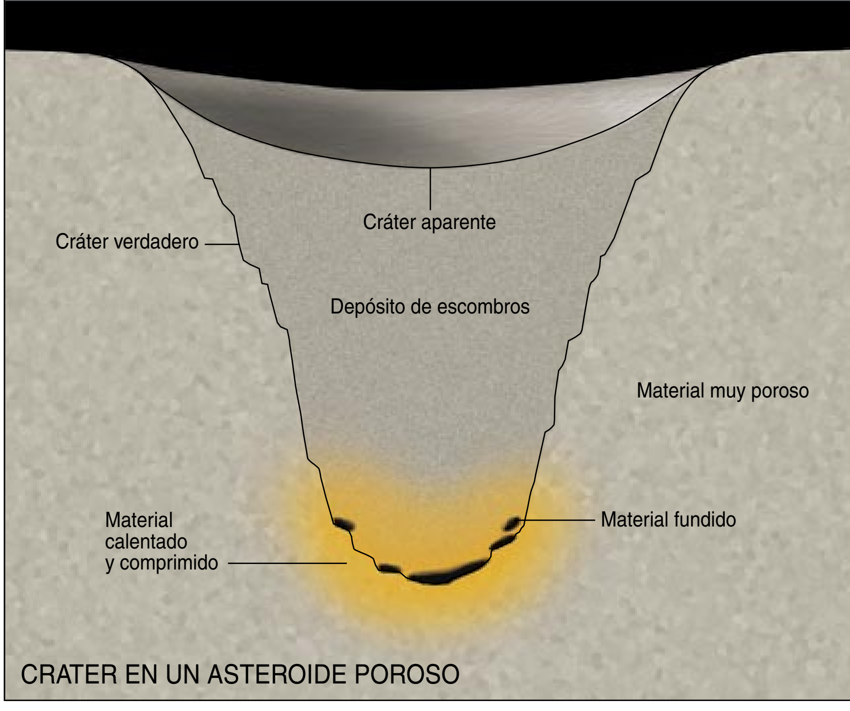
El meteorito Kernouvé, una condrita común de 4450 millones de años, cayó sobre Francia en 1869. Se pensó que no presentaba efectos de choque: los granos de silicatos no parecían estar deformados. Sin embargo, la existencia de vetas de metales, en amarillo en la imagen, prueban que un impacto de gran energía calentó la roca.



COMPARACION DE CRATERES

Cuando un objeto impacta sobre un cuerpo cohesionado como la Tierra, se crea un cráter con forma de cuenco y se expulsan grandes cantidades de residuos (*arriba*). Parte de los escombros se depositan sobre el cráter (dando forma al cráter aparente, alrededor de la mitad menos profundo que el verdadero cráter), y otra parte cae por los laterales. Pero si un objeto golpea a un asteroide de baja densidad, se perfora el material poroso como una bala que se incrustase en poliestireno (*abajo*). La energía del impacto se invierte en calentar y en comprimir las rocas, no en expulsarlas. Los escombros caen de nuevo al cráter, con el retraso consiguiente de la pérdida de calor. Este proceso quizás explica por qué muchos meteoritos presentan signos de impactos y de calentamiento.





JEN CHRISTIANSEN

incrementó la temperatura de los asteroides en apenas 180 grados. Concluyeron que el calor generado por la desintegración conjunta del ^{26}Al y del ^{60}Fe no constituía la fuente de la fusión de los asteroides.

Otro mecanismo de calentamiento posible es la inducción electromagnética. El Sol joven pudo haber producido un intenso viento solar ionizado, con un campo magnético asociado, que se desplazase hacia el exterior a cientos de kilómetros por segundo. De haberse topado este viento con asteroides eléctricamente conductores, habría provocado en ellos corrientes generadoras de calor. Esta idea, sin embargo, cuenta con pocos defensores debido a sus incertidumbres. No está claro que el Sol joven emitiese vientos tan intensos. Es más, las estrellas nacientes con vientos tienden a eyectarlos hacia los polos, lejos de donde residen los asteroides, los discos ecuatoriales de acreción que rodean a la estrella.

Calentamiento por colisiones

La única alternativa viable que queda es el calor producido en la colisión de dos asteroides, una hipótesis no exenta de problemas. El grupo de Klaus Keil, director del Instituto de Geofísica y Planetología de la Universidad de Hawai en Manoa, ha planteado varias objeciones. En primer lugar, un impacto sólo aumenta la temperatura global de un objeto del tamaño de un asteroide en unos grados. En segundo lugar, la alta relación entre la superficie y el volumen de estos cuerpos favorece la pérdida de calor; de un impacto a otro se habrían enfriado enseguida. En tercer lugar, un impacto típico genera cantidades pequeñas de roca fundida, en comparación con el gran volumen de escombros producidos. Y finalmente, las bajas velocidades de escape de los asteroides permiten la dispersión de la mayor parte del material más calentado.

A pesar de que estas objeciones parecen sólidas, podrían carecer de importancia porque presuponen que el objeto del impacto es un cuerpo cohesionado, con poca porosidad, como la Tierra o la Luna. Pero, según se avanzó, el descubrimiento de que muchos asteroides presentan una baja densidad (sólo 1,2 gramos por centímetro cúbico) apunta a que son pilas de escombros muy porosas. La porosidad que se le estima a Matilde llega al 50 por ciento: la mitad de este asteroide es espacio vacío. Aún más, la porosidad de los asteroides quizá fuera todavía mayor nada más haberse constituido a partir de los residuos del sistema solar joven. La acreción no ocurre demasiado deprisa y construye estructuras esponjosas; se necesitan impactos muy enérgicos para comprimir el material poroso y crear cuerpos cohesionados.

Cuando un meteorito grande impacta en la superficie de la Tierra se crea un cráter somero; en un asteroide de baja densidad, un impacto similar abriría en el cuerpo poroso una depresión profunda, casi cilíndrica. La energía de choque se atenúa con

rapidez en los materiales porosos; por ello, el impacto calienta eficazmente las rocas que bordean el profundo cráter. Comparado con una colisión entre objetos compactos, se consume más energía en calentar las rocas dentro del asteroide y menos en expeler desechos. Los escombros tienden a depositarse en la depresión; cubren, pues, el cráter inicial y actúan como una alfombra que retrasase la pérdida de calor. Aunque la temperatura global de un asteroide no aumentaría demasiado, ciertas zonas sí se calentarían quizá mucho; algunas rocas se fundirían incluso. Los impactos sucesivos darían lugar a múltiples regiones metamórficas alrededor de los cráteres.

Los estudios sobre meteoritos están recogiendo pruebas que apoyan la hipótesis del calentamiento por colisiones. Desde siempre, los investigadores venían determinando si un meteorito había experimentado un efecto de choque mediante el examen de la estructura de los granos de silicatos. Los efectos de choque intensos deforman las estructuras cristalinas y crean mosaicos reconocibles al microscopio. (La colisión que separó el meteorito de su asteroide progenitor no suele ser la causa del efecto de choque; los residuos se expulsan sin que sus constituyentes sufran alteraciones considerables.)

Hace poco he examinado más de 200 condritas comunes metamórficas que estaban clasificadas entre los objetos sin efecto de choque o con efectos de choque débiles, al no parecer que los granos de silicato se hubiesen deformado. He encontrado sin embargo que todas y cada una de estas rocas portaban otras huellas de choque, así la presencia de vetas de metales. (Puesto que los metales alcanzan puntos de fusión más bajos que los silicatos, con frecuencia se licuan y forman vetas tras un impacto.) Mi conclusión es que todas las condritas comunes metamórficas han sufrido efectos de choque y se han calentado, algunas en múltiples ocasiones. Esos efectos de choque se pierden con facilidad: el calor los borra al templar los granos deformados de los silicatos.

El grupo dirigido por Eleanor Dixon realizamos la datación isotópica de una condrita común con rasgos de choque y calentamiento; demostramos que la roca sufrió, hace 4270 de millones de años, un proceso así. Los radioisótopos de vida media corta no pudieron ser la fuente del calentamiento, porque éste ocurrió 300 millones de años —o unas 400 vidas medias del ^{26}Al— después de la formación de los asteroides. Si los impactos generaron calor tan tarde en la historia del sistema solar, debieron de ser también muy efectivos calentando asteroides en épocas anteriores, cuando abundaban más las colisiones. He identificado condritas comunes metamórficas compatibles con esta hipótesis; datan de hace 4450 millones de años y muestran efectos de choque: ensamblajes de metal fundido y sulfuros contiguos a silicatos que parecen templados.

Una correlación positiva entre el grado metamórfico de las condritas y la magnitud de los efectos de choque experimentados respaldaría la hipótesis de que los impactos fueron la causa principal del calentamiento de los asteroides. Las rocas que recibieron un impacto más fuerte deben, según la hipótesis, presentar un mayor calentamiento. Los datos de más de 1650 condritas comunes que recogí del Catálogo de Meteoritos demuestran que tal correlación existe. Los modelos del calentamiento por colisión predicen, además, que los grupos de condritas con las mayores proporciones de miembros metamórficos deberían presentar las mayores proporciones de miembros que han sufrido efectos de choque. Y tal ocurre con las condritas comunes y las carbonáceas.

En resumen, una valoración justa de las pruebas indica que tanto las colisiones como la desintegración radiactiva del ^{26}Al calentaron los asteroides. En mi opinión, la fuente de calor principal fueron las colisiones, pero la mayoría de los cosmoquímicos continúan apostando sólo por el ^{26}Al. Si prevaleció el calentamiento por impacto, la historia térmica de los asteroides diferirá de las predichas por los modelos ordinarios, que atribuyen una disposición en capas de cebolla al interior de los asteroides. Por ejemplo, los tiempos de enfriamiento de las rocas enterradas bajo los cráteres son bastante más cortos que los millones de años que les habría llevado enfriarse a las rocas interiores calentadas por la desintegración radiactiva del ^{26}Al. En fecha reciente, Ed Scott, de la Universidad de Hawai en Manoa, comprobó que los datos sobre los tiempos de enfriamiento de un conjunto de condritas comunes contradicen la estructura en capas predicha por el calentamiento por ^{26}Al.

Los asteroides, los planetas y los cometas comparten un origen común. Los mismos impactos que formaron y acribillaron los asteroides dieron nacimiento a la Tierra; los cuerpos del cinturón de asteroides se habrían aglomerado para formar un planeta, si no hubiera sido por la influencia gravitatoria de Júpiter. Por este motivo, los asteroides nos ofrecen un vislumbre del estado evolutivo de nuestro propio planeta hace 4500 millones de años. Las ancestrales superficies golpeadas de esos cuerpos rocosos señalan que los impactos violentos fueron frecuentes durante cientos de millones de años. El reconocimiento actual de que las colisiones entre asteroides debieron de contribuir al calentamiento de dichos cuerpos prueba, una vez más, que los efectos de los impactos no son sólo superficiales.

El autor

Alan E. Rubin es geoquímico de la Universidad de California en Los Angeles. Se doctoró en geología por la Universidad de Nuevo México en 1982. En el año 2002, el asteroide 6227 recibió el nombre de "Alanrubin" en reconocimiento a su contribución al campo.

Bibliografía complementaria

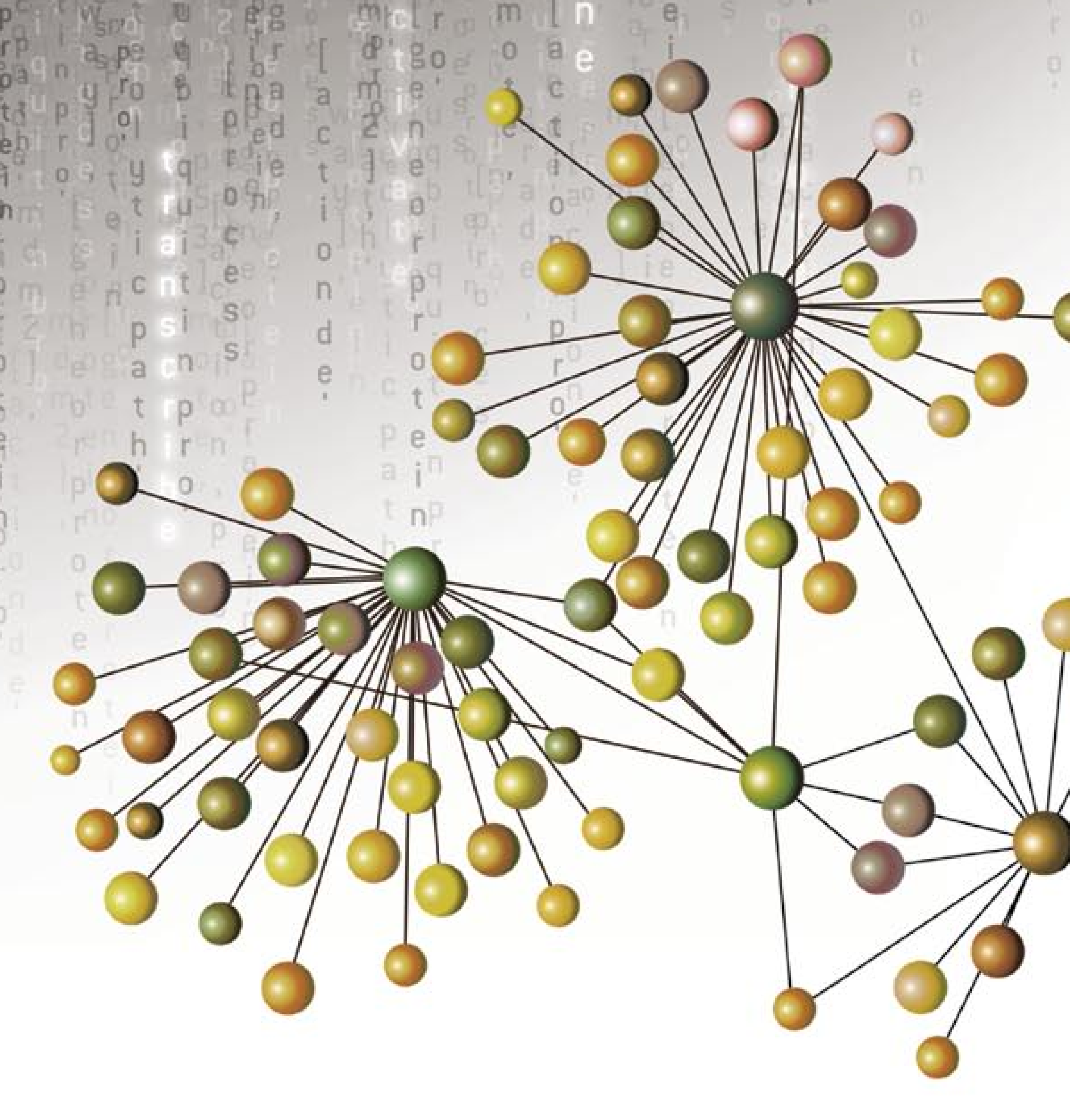
METEORITES AND THEIR PARENT PLANETS. Segunda edición. Harry Y. McSeen, Jr. Cambridge University Press, 1999.

ASTEROIDS III. Dirigido por W. F. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi y R. P. Binzel. University of Arizona Press, 2002.

TREATISE ON GEOCHEMISTRY, Vol. 1: "METEORITES, COMETS, AND PLANETS". Dirigido por Andrew M. Davis. Elsevier, 2003.

ASTEROID HEATING: A SHOCKING VIEW. G. Jeffrey Taylor. Disponible en la red en www.psrd.hawaii.edu/April04/asteroidHeating.html

Minería de textos científicos



Del mismo modo en que los motores de búsqueda localizan la información en la Red, una nueva herramienta lógica explora la bibliografía científica en busca de nuevas rutas moleculares

Gary Stix

El primer proyecto en que participó Andrey Rzhetsky cuando, en 1996, llegó a la Universidad de Columbia en calidad de científico investigador implicaba una búsqueda bibliográfica que debía arrojar luz sobre por qué los linfocitos (células blancas de la sangre) no mueren afectados por la leucemia linfocítica crónica. Rzhetsky encontró varios centenares de artículos sobre apoptosis (muerte celular programada) y cáncer. Aunque hubiese dedicado todo su tiempo en el empeño, le hubiese resultado imposible realizar una exploración exhaustiva de todo cuanto se había publicado en las revistas especializadas. Y lo que era peor, aquello correspondía sólo a la punta del iceberg.

La experiencia le llevó a concebir una herramienta que le allanaría el camino: un motor de búsqueda automatizada que encontrara y leyera toda la bibliografía. No sólo le ahorraría una mareante tarea, sino que, además, le permitiría dejar que una máquina "investigara" por su cuenta, reconociendo relaciones subyacentes entre los datos, de la misma forma en que lo haría un humano. (Esta idea había sido bosquejada por Masatoshi Nei, tutor de Rzhetsky durante su estancia posdoctoral en la Universidad estatal de Pennsylvania; estancia que comenzó en 1991, después de trabajar en el Instituto de Citología y Genética, un centro de matemáticas aplicadas a la biología ubicado en Novosibirsk, Siberia.)

Además de embeberle de lleno en las búsquedas bibliográficas, el proyecto de la leucemia le hizo darse cuenta de que las rutas moleculares (patrones de interconexión) de genes y proteínas, estaban poco exploradas. En 1997, el Centro de Tecnología Avanzada de la universidad otorgó a Rzhetsky una subvención de 100.000 dólares para acometer el desarrollo de su herramienta de búsqueda automatizada. Algunos expertos en lenguaje natural —dominio de la inteligencia artificial que estudia los lenguajes utilizados por humanos, no por computadores— estaban desarrollando herramientas para la búsqueda y extracción de datos biológicos, pero fundamentalmente a partir de resúmenes, no de artículos completos.

Rzhetsky emprendió el diseño de un sistema que, además de buscar en los artículos enteros, identificase conexiones entre genes y proteínas que hubiesen pasado inadvertidas (en síntesis, que generase conocimiento y nuevas hipótesis a partir del análisis de un gran volumen de información almacenada). Confiaba en el poder de la minería de textos para vislumbrar nuevas rutas moleculares, que, posteriormente, se comprobarían en el laboratorio. Así nació el sistema GeneWays.

Para llegar a ser algo más que una simple versión esplendorosa de Google, GeneWays debía incorporar varios módulos de instrucciones lógicas (*software*). Cada módulo asumiría una tarea: por ejemplo, transferir artículos desde la Red, deducir las diversas rutas moleculares y generar gráficos que representasen cada gen o proteína y sus interconexiones. Tras descargar un artículo y despojarlo de su codificación para convertirlo en un texto sin formato —eliminar las instrucciones en HTML, por ejemplo, plantea por sí mismo todo un reto—, el programa debía "comprender" los términos empleados por el autor. El vocablo "p53", por ejemplo, puede referirse a un gen, a una proteína o a un ARN mensajero, según el contexto. Además, en el caso de algunos genes —*eternamente joven* ("*forever young*" o *fey*) en *Arabidopsis thaliana* o *madres contra los decapentapléjicos* ("*mothers against decapentalegic*" o *mad*) en *Drosophila melanogaster*— su función queda enmascarada por el capricho de quienes los bautizaron.

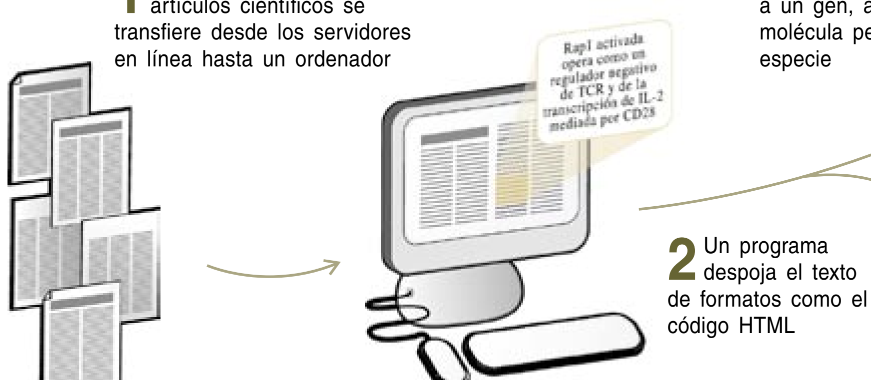
Para resolver este problema se utilizaron las mejores herramientas de estadística y de inteligencia artificial. De todos los elementos que participan en esta fase de

ALISON KENDALL

MINERIA DE TEXTOS: EXTRACCION DE CONOCIMIENTO NUEVO A PARTIR DE INFOR

El programa GeneWays "lee" decenas de miles de artículos científicos y clasifica la información que éstos contienen de forma automática en una base de datos. Cuando se le pide información acerca de una molécula determinada o de una ruta metabólica, la base de datos define las relaciones de esa molécula con otras. Así se descubren nuevas rutas moleculares. La minería de textos permite realizar una búsqueda bibliográfica de mayor alcance que la que podría llevar a cabo una persona utilizando métodos manuales.

1 El texto completo de los artículos científicos se transfiere desde los servidores en línea hasta un ordenador



2 Un programa despoja el texto de formatos como el código HTML

3 El texto se somete a otras etapas de procesamiento. Por ejemplo, se determina si un término técnico corresponde a un gen, a una proteína, a una molécula pequeña o a una especie



4 Una vez filtrado el texto, GENIES, un módulo de análisis sintáctico, lo traduce a un formato que pueda ser interpretado por un computador para establecer luego relaciones entre entidades moleculares

identificación y desambiguación, el más comprensible es el que marca las distintas partes del discurso para que otros módulos puedan reconocer sintagmas nominales del tipo "el supresor de tumores p53". El resto de esta picadora de información constituye una maraña que combina las matemáticas con la informática: en ella intervienen máquinas de soporte vectorial, modelos de Markov ocultos, clasificadores de Naive Bayes y algoritmos de árboles de decisión.

Una vez que un objeto ha sido identificado como un gen, una proteína, un ARN o una molécula de pequeño tamaño, GeneWays procede a ordenar la información mediante GENIES, un módulo de análisis sintáctico. Así es como el ordenador "lee" cada una de las frases de un artículo.

Rzhetsky y su grupo sacaron un gran provecho del trabajo de los expertos en lenguaje natural. En 1995, Carol Friedman había dirigido en Columbia un equipo que desarrolló un sistema de lenguaje natural, el MedLEE. Permitía extraer la información textual de los registros médicos de radiografías torácicas de lo que ahora es el Hospital Presbiteriano de Nueva York (y posteriormente de otros registros) para ser utilizada en diversos sistemas de información hospitalaria automatizados. Friedman y Rzhetsky utilizaron algunas partes de MedLEE como punto de partida para el desarrollo de una gramática especializada en biología molecular, que especifica relaciones entre diversas entidades moleculares.

GENIES empieza el proceso entresacando de un artículo sobre biología molecular la siguiente frase:

> Estudios recientes señalan que mdm2 promueve la rápida degradación de p53 a través de la ruta proteolítica de la ubiquitina.

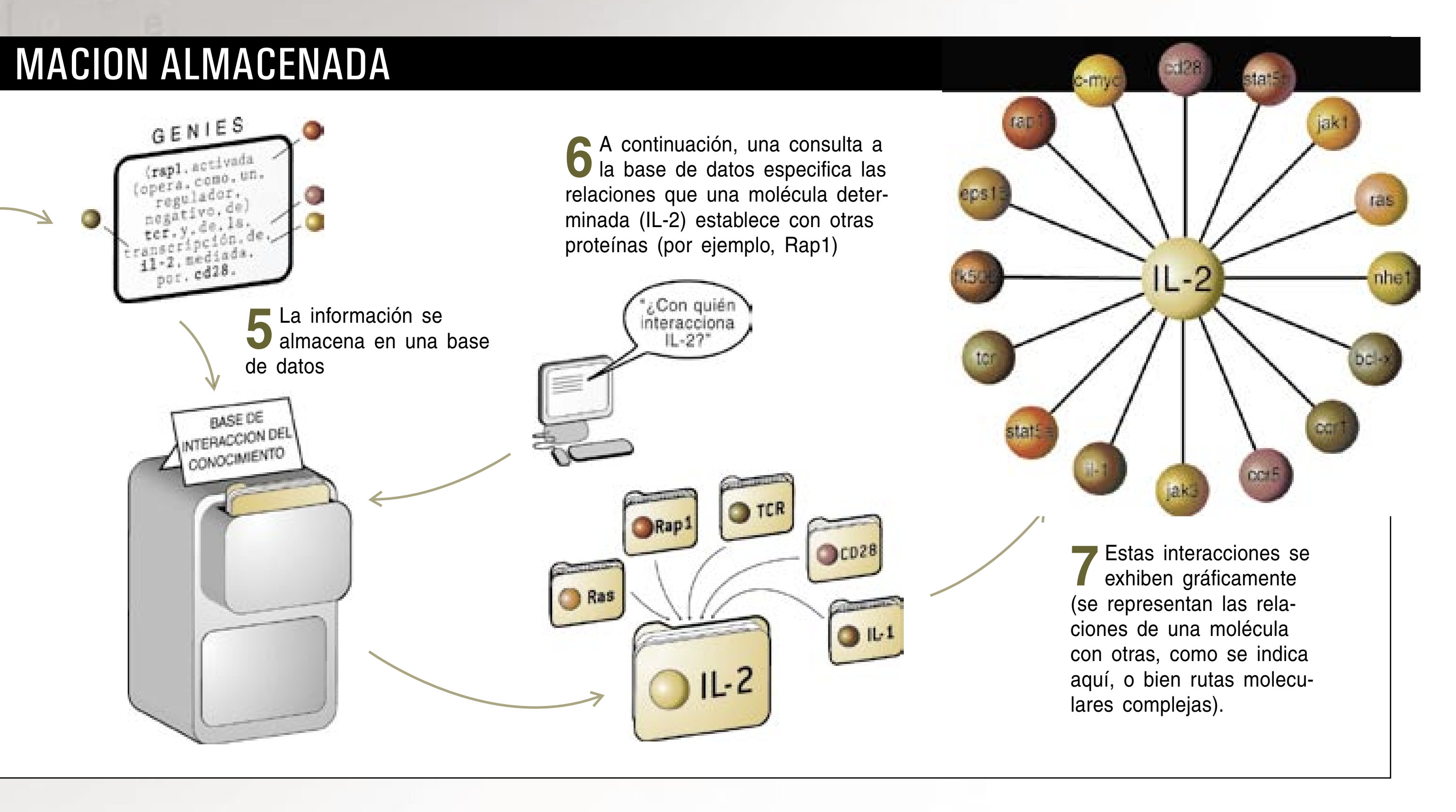
De ahí extrae que una proteína, mdm2, degrada a otra, p53, a través de una ruta enzimática en la que interviene una proteína, la ubiquitina, y lo transforma en:

```
[acción promover,
    [genoproteína mdm2],
    [acción degradar,
        [proceso ruta proteolítica ubiquitina],
        [genoproteína p53]]]
```

A continuación, una base de datos (la Base de Interacción del Conocimiento) almacena, para luego recuperarlo, este árbol semántico. Sus más de dos millones de enunciados distintos, del tipo "mdm2 promueve la degradación de p53", se utilizan para encontrar relaciones entre moléculas o construir nuevas redes de interacciones moleculares. Estos enunciados se extraen del texto completo de unos 250.000 artículos publicados en 80 revistas de biología molecular. Otros módulos de GeneWays determinan la fiabilidad de un enunciado concreto, buscan relaciones adicionales o elaboran una representación gráfica de las rutas.

La idea de modelar interacciones moleculares a partir de la bibliografía existente tardó en ser aceptada por el grueso de la comunidad científica. Durante años, el estadounidense Instituto Nacional de la Salud (NIH) y la Fundación Nacional para la Ciencia rechazaron las solicitudes de subvención de Rzhetsky. Aducían que GeneWays o bien resultaría irrealizable o bien sólo redescubriría lo obvio, revelando rutas ya conocidas por los expertos. Hace un lustro, sin motivo aparente, se reanudaron las subvenciones; para entonces, el campo de la bioinformática ya había adquirido identidad propia.

LUCY READING-IKKANDA



En 2001, Rzhetsky inició una colaboración con Kevin White, de la Universidad de Yale. White ayudó a ampliar el ámbito de la Base de Interacción del Conocimiento, incorporando datos genómicos y proteómicos no procesados de *D. melanogaster*. Las representaciones gráficas obtenidas a partir de textos así como de datos experimentales identificaron nuevas rutas posibles que afectaban a genes implicados en el desarrollo temprano de dicho organismo, genes que podían estudiarse luego en el laboratorio. La nueva herramienta permitía explorar sistemáticamente y de forma simultánea varios conjuntos de datos de gran tamaño.

En otro proyecto, Rzhetsky colaboró con investigadores de la Universidad de Columbia para identificar nuevos genes relacionados con la enfermedad de Alzheimer. GeneWays partió de un núcleo de cuatro genes cuya intervención en el desarrollo del Alzheimer estaba probada; a continuación, basándose en un análisis bibliográfico, creó un modelo de genes y proteínas que interaccionaban con esos cuatro genes. Se suponía que los mejores candidatos, los genes con mayor probabilidad de estar relacionados con el Alzheimer, serían los conectados a los genes iniciales mediante el mínimo número de eslabones. Los genes así identificados coincidieron estrechamente con los que un experto había hallado sirviéndose de métodos manuales.

La precisión de la minería de textos automatizada no es equiparable —y probablemente nunca lo será— al trabajo del documentalista que escudriña los documentos uno por uno. Pero, cuando no se dispone de recursos humanos suficientes para explorar toda la bibliografía de interés, GeneWays resulta de la mayor utilidad.

Rzhetsky se propone seguir desarrollando GeneWays hasta que su base de conocimiento abarque toda la biología y la química. Por ahora, Rzhetsky, White y sus colaboradores están trabajando para ampliar las aplicaciones de GeneWays: utilizan el análisis bibliográfico para mostrar cómo se llega al consenso entre biólogos. A tenor de sus hallazgos, al nivel más fundamental, el instinto gregario prevalece. Un enunciado sencillo —“La proteína A activa el gen B”, por ejemplo— a menudo se toma como una verdad indiscutible, un pequeño dogma que dificulta la aceptación de las hipótesis que contradigan el pensamiento vigente, incluso ante la emergencia de nuevos indicios que las respalden.

La aportación de pruebas documentales al proceso de razonamiento colectivo pone de manifiesto la capacidad de GeneWays para ahondar en la bibliografía. Muestra también el potencial de la minería de textos para ampliar los análisis bibliográficos y unificar así el espectro completo del conocimiento humano.

Bibliografía complementaria

MINING THE BIOMEDICAL LITERATURE IN THE GENOMIC ERA: AN OVERVIEW. H. Shatkay y R. Feldman en *Journal of Computational Biology*, vol. 10, n.º 6, páginas 821-855; diciembre de 2003.

GENEWAYS: A SYSTEM FOR EXTRACTING, ANALYZING, VISUALIZING, AND INTEGRATING MOLECULAR PATHWAY DATA. Andrey Rzhetsky y col. en *Journal of Biomedical Informatics*, vol. 37, n.º 1, páginas 43-53; febrero de 2004.

MOLECULAR TRIANGULATION: BRIDGING LINKAGE AND MOLECULAR-NETWORK INFORMATION FOR IDENTIFYING CANDIDATE GENES IN ALZHEIMER’S DISEASE. Michael Krauthammer, Charles A. Kaufmann, T. Conrad Gilliam y Andrey Rzhetsky en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 101, n.º 42, páginas 15.148-15.153; 19 de octubre de 2004.

Halogenuros orgánicos

Aunque suelen asociarse a la industria química, los compuestos halogenados abundan, también, en nuestro entorno natural

Gordon W. Gribble

El DDT (diclorodifeniltricloroetano), las dioxinas, los PCB (bifenilos policlorados), los CFC (clorofluorocarburos) y otros compuestos clorados (que contienen cloro) sintéticos pertenecen al grupo de los contaminantes persistentes. Menos conocido es que la naturaleza produce una gran cantidad de sustancias halogenadas similares, o incluso idénticas, a las sintéticas. Algunas de ellas precedieron el inicio de la vida en la Tierra.

Desde el simple y omnipresente cloruro de metilo hasta la compleja vancomicina (antibiótico clorado), la naturaleza es capaz de crear halocarburos con una variedad y complejidad estructural que los químicos de carne y hueso no logran reproducir en sus laboratorios. Los compuestos orgánicos halogenados originados exclusivamente en la naturaleza se cuentan por millares: hasta la fecha, se han identificado 2350 cloruros, 2050 bromuros, 115 yoduros y 34 fluoruros. Las bacterias, los hongos, las plantas y los animales —humanos incluidos— producen, todos ellos, halocarburos.

Tales halocarburos se generan también, de forma abiótica, en incendios forestales, erupciones volcánicas y otros fenómenos geotérmicos. En algunos casos, los compuestos naturales coinciden con los que se sintetizan para uso industrial. Aun así, la elevada toxicidad —y extendida publicidad— de los plaguicidas clorados y otros productos industriales de este tipo generan tales prejuicios entre la población general, que muy pocos imaginan que las moléculas halogenadas se producen también en plena naturaleza.

La bioprospección, la exploración del mundo vivo en búsqueda de sustancias orgánicas de interés, ha llevado a cientos de compuestos naturales que contienen átomos de cloro y de bromo. Esta búsqueda debe gran parte de sus logros a la técnica SCUBA (de “Self-Contained Underwater Breathing Apparatus”, aparato independiente para respirar bajo el agua), que ha ampliado los horizontes de la investigación marina.

Los organismos marinos constituyen la principal fuente de halocarburos, lo que no debe sorprendernos si recordamos los altos contenidos en cloro y bromo del agua del mar. El “olor a mar” emerge, en parte, de organohalogenados volátiles que desprenden las algas marinas. El bromuro de metilo, el yoduro de metilo, el bromoformo y otros compuestos de este tipo son utilizados también por la industria química como plaguicidas o como precursores en la síntesis de otros productos. No obstante, la mayoría de los halogenuros orgánicos son nuevos para la ciencia; nunca han sido sintetizados en un laboratorio. En los organismos que los producen, desarrollan múltiples funciones: operan como repelentes e inhibidores del apetito, agentes antibacteriales y antiincrustantes, feromonas y hormonas.

Halógenos elementales

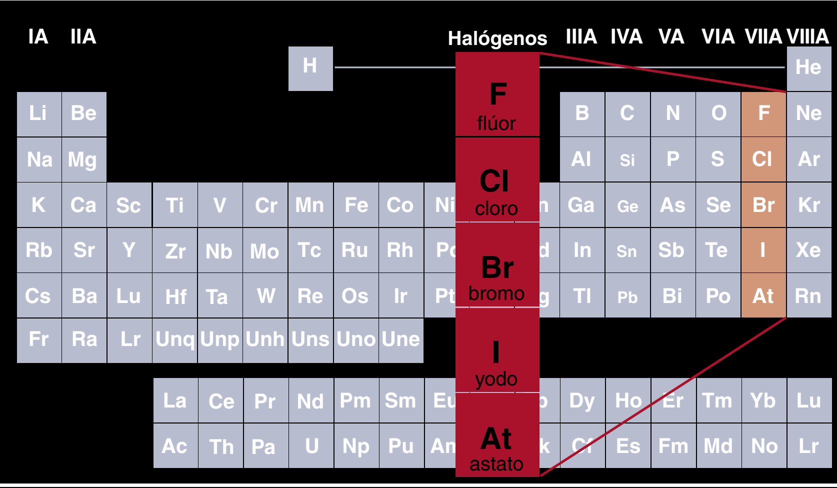
Un halógeno —etimológicamente, “formador de sal”— es un elemento dotado de siete electrones en su capa de valencia (la más externa), uno menos que los necesarios para completarla y conferir estabilidad al átomo. El notable beneficio que comporta la adquisición de este octavo electrón —relajación en un estado de energía inferior— hace que los halógenos reaccionen de forma agresiva para obtenerlo. En razón de tan elevada afinidad electrónica negativa, los halógenos se combinan fácilmente con otros elementos.

Su configuración heptaelectrónica común se refleja en la tabla periódica: todos los halógenos se hallan agrupados en la misma columna. De los cinco elementos del grupo (denominado grupo VII), el flúor (F), el cloro (Cl), el bromo (Br) y el yodo (I) se hallan en moléculas biológicas. El último y mayor de los halógenos elementales, el astato (At), es radiactivo y no se encuentra en la naturaleza.

En estado puro, los halógenos forman moléculas diatómicas: por ejemplo, el F_2 (diflúor) o el Cl_2 (dicloro), ambos gases altamente reactivos. Cuando se combinan, tienden a formar compuestos iónicos con metales (el cloruro de sodio, o sal común, por ejemplo) y compuestos covalentes con no metales (moléculas orgánicas halogenadas u *organohalogenados*).

Marinos

Las esponjas, los corales y la mayoría de las algas marinas, confinados en los arrecifes, comparten una incapacidad para evadirse de predadores y parásitos. A falta de otros medios de defensa, estos organismos se apoyan



Compuesto	Fórmula	Halógeno	Industria	Naturaleza
flúor (gas)	F_2	F	si	sí
ácido fluoroacético	$C_2H_3O_2F$	F	sí	sí
fluoruro de hidrógeno	HF	F	sí	sí
tetrafluoroetileno	C_2F_4	F	sí	sí
CFC-11	CCl_3F	F, Cl	sí	sí
2,4-diclorofenol	$C_6H_4OCl_2$	Cl	sí	sí
2,6-diclorofenol	$C_6H_4OCl_2$	Cl		sí
tetracloruro de carbono	CCl_4	Cl	sí	sí
cloro (gas)	Cl_2	Cl	sí	sí
ácido cloroacético	$C_2H_3O_2Cl$	Cl	sí	sí
cloroformo	$CHCl_3$	Cl	sí	sí
clorofenol	C_6H_5OCl	Cl	sí	sí
criptoficina 1	$C_{35}H_{43}N_2O_8Cl$	Cl		sí
DDT (1,1,1-tricloro-2,2-bis-(*p*-clorofenil)etano)	$C_{14}H_9Cl_5$	Cl	sí	
diclorometano	CH_2Cl_2	Cl	sí	sí
dioxina (p.ej. 1,3,6,8-tetraclorodibenzo-*p*-dioxina)	$C_{12}H_4O_2Cl_2$	Cl	sí	sí
epibatidina	$C_{11}H_{13}N_2Cl$	Cl		sí
cloruro de hidrógeno	HCl	Cl	sí	sí
ácido hipocloroso	HClO	Cl	sí	sí
lindano	$C_6H_6Cl_6$	Cl	sí	
maracen A		Cl		sí
cloruro de metilo (o clorometano)	CH_3Cl	Cl	sí	sí
PCB (bifenilos policlorados, p. ej. 2,2',4,4',5,5'- hexaclorobifenilo)	$C_{12}H_4Cl_6$	Cl	sí	
punaglandina 1	$C_{27}H_{37}O_{10}Cl$	Cl		sí
Q1	$C_9H_3N_2Cl_7$	Cl		sí
espongistatina 9	$C_{61}H_{91}O_{20}Cl$	Cl		sí
vancomicina	$C_{66}H_{75}N_9O_{24}Cl_2$	Cl		sí
kalihinol (previene el crecimiento de cirrípedos)	$C_{22}H_{33}N_2O_2Cl$	Cl		sí
telfairina	$C_{10}H_{14}Cl_3Br$	Cl, Br		sí
dioxinas bromadas (p. ej. 1-hidroxi-3,4,6,8-tetrabromodibenzo-*p*-dioxina)	$C_{12}H_4O_3Br_4$	Br		sí
bromoformo	$CHBr_3$	Br	sí	sí
bromuro de metilo	CH_3Br	Br	sí	sí
panaceno	$C_{15}H_{15}O_2Br$	Br		sí
aplisiatoxina (causa picor en los nadadores)	$C_{32}H_{47}O_{10}Br$	Br		sí
yoduro de metilo	CH_3I	I	sí	sí
tiroxina	$C_{15}H_{11}NO_4I_4$	I		sí

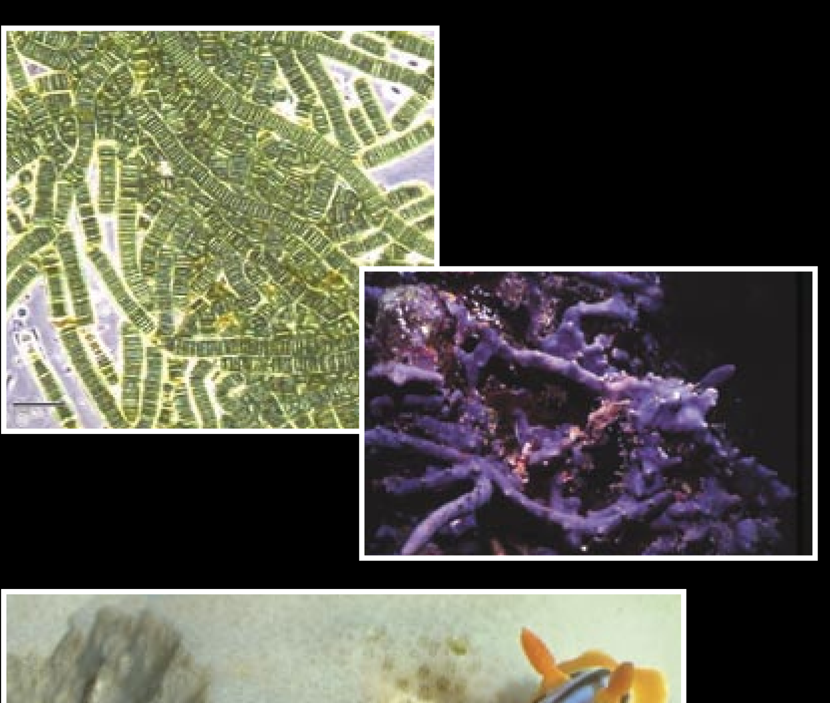
1. LOS ELEMENTOS HALOGENOS cuentan con siete electrones en su capa de valencia, la más externa. Esta propiedad común se refleja en la tabla periódica: todos los halógenos se hallan agrupados en la misma columna (*arriba*). El flúor, el cloro, el bromo y el yodo se encuentran en la naturaleza. Un gran número de sustancias organohalogenadas son sintetizadas por organismos y por la industria química. Se presenta aquí una lista (parcial) de los compuestos mencionados en el artículo.

BARBARA AULICINO *Sigma Xi/American Scientist*

en armas químicas de fabricación propia: son unos productores prodigiosos de halocarburos. Entre las armas de las esponjas se encuentran dioxinas bromadas (análogas a las dioxinas industriales de triste fama) y numerosos metabolitos que previenen el sobrecrecimiento de cirrípedos; con ello, resuelven un problema que afecta a barcos, muelles y casi todas las construcciones humanas que ocupan el medio marino. En Hawai, un compuesto bromado de origen algal causa erupciones cutáneas (dermatitis) a los bañistas; en la limu kohu —el alga comestible favorita de los nativos— se han hallado por lo menos 100 organohalogenados, de estructura química antaño desconocida.

Los nudibranquios y las liebres de mar, dos variedades de babosas marinas sin caparazón, se sirven también de armas químicas para sobrevivir en un mundo de predadores. Cierta especie de liebre de mar secreta un metabolito bromado de sabor amargo, el panaceno, para disuadir a los tiburones y a otros posibles comensales. Algunos nudibranquios carecen de la capacidad para sintetizar su arsenal químico: lo adquieren por medio de una dieta basada en esponjas y algas. En este caso, la bioacumulación de compuestos nocivos en la cadena trófica tiene un propósito específico y, para las babosas, deseable.

Los compuestos organohalogenados naturales se bioacumulan también en predadores de nivel superior. Los primeros en descubrirse fueron los bipirroles halogenados de aves marinas (gaviotas, albatros, frailecillos, águilas), probablemente producidos por una bacteria marina. Un compuesto relacionado, el Q1, se ha hallado en una miríada de consumidores marinos (focas y delfines, entre otros) y en la leche de las mujeres de las islas Feroe, que comen grasa de ballena. Estas sustancias naturales guardan semejanza con los PCB antropogénicos —una vez usados en transformadores y condensadores eléctricos— en cuanto a la estructura química y a la propensión a concentrase en la cima de la cadena trófica. Los efectos nocivos de los PCB sintéticos son harto conocidos; en cambio, están por discernir los efectos de Q1 y otros halocarburos naturales en la salud de los consumidores de orden superior.





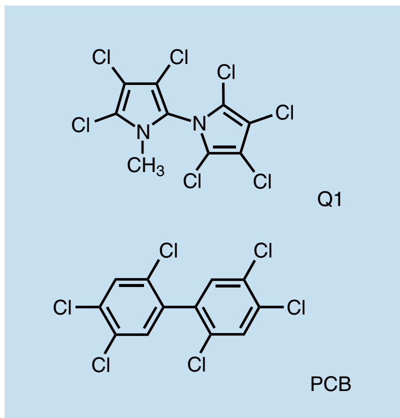
2. LAS ESPECIES MARINAS constituyen la principal fuente de halogenuros orgánicos. El alga azulverdosa *Lyngbya* (*arriba izquierda*) sintetiza aplisiatoxina, compuesto bromado que causa erupciones cutáneas a los bañistas. La esponja *Dysidea dendyi* produce varias dioxinas bromadas; en la imagen se muestra su pariente cercano *Dysidea granulosa* (*arriba derecha*). El vistoso nudibranquio *Chromodoris hamiltoni* (*abajo*) sintetiza también sus propios metabolitos clorados.

espongiadioxina A — 1,3,6,8-TCDD — 2,3,7,8-TCDD

3. LAS DIOXINAS SON TOXICAS, pero no todas provienen de la industria química. Estos tres ejemplos ilustran la variedad de fuentes posibles. De izquierda a derecha: la espongiadioxina A, sintetizada por *Dysidea dendyi*; 1,3,6,8-tetraclorodibenzo-*p*-dioxina (1,3,6,8-TCDD), producto de la descomposición de la masa vegetal en las turberas de New Brunswick; y 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-*p*-dioxina (2,3,7,8-TCDD), un compuesto de síntesis industrial.

ROLF SCHAUDER (*arriba*), FRANCIS SCHMITZ (*centro*), BILL RUDMAN (*abajo*); CHRIS BRODIE *Sigma Xi (estructura química)/American Scientist*





4. NUMEROSOS CONSUMIDORES MARINOS de orden superior, entre ellos el delfín mular (*Tursiops truncatus, izquierda*), los pingüinos, las focas y los humanos, muestran bioacumulación de Q1. Este organoclorado natural es retenido en el tejido adiposo de forma similar a los PCB (bifenilos policlorados) industriales.

NOAA (*fotografía*); CHRIS BRODIE *Sigma Xi (estructura química)/American Scientist*

Continentales

Aunque menos prolíficos que sus parientes acuáticos, las plantas y hongos terrestres producen un extenso repertorio de sustancias cloradas, bromadas y, en menor cantidad, fluoradas. El compuesto orgánico de bromo más simple, el bromuro de metilo (o bromometano), es un fumigante y plaguicida comercial. Recientemente fue prohibido en California en razón de su poderosa actividad destructora de la capa de ozono. Pero lo sintetizan también algunas especies de la familia de las *Brassicaceae*: la col, el brécol, el nabo y la semilla de colza (canola). La producción global de bromuro de metilo por parte de las plantas de colza se sitúa alrededor de 6600 toneladas anuales, de carácter antropogénico un 15 por ciento del total.

Los árboles de hoja perenne, las patatas y otras especies de plantas que nos resultan familiares, producen cloruro de metilo. Su síntesis está tan extendida, que constituye el compuesto clorado más abundante —con independencia de la fuente— en la atmósfera. Existen, además, otros cloruros orgánicos de reseñable interés: las hormonas del crecimiento presentes en las judías y en los guisantes, un cóctel de siete fungicidas producido por el lirio japonés (comestible) y el 2,4-diclorofenol, hormona de crecimiento del moho *Penicillium*. Esta última sustancia se utiliza en la síntesis de numerosos compuestos; por ejemplo, en el herbicida "2,4-D", uno de los dos ingredientes principales del "agente naranja", el defoliante químico usado en la guerra de Vietnam.

No abundan fluorocarburos naturales, dada la escasa biodisponibilidad del flúor. El de mayor relevancia es el ácido fluoroacético, presente en plantas endémicas de Australia y Africa del Sur. Un compuesto extremadamente venenoso es culpable de la muerte de miles de cabezas de ganado. Antaño incluso en el oeste norteamericano se utilizó (en forma del plaguicida "1080") para acabar con coyotes y roedores. La toxicidad del 1080 proviene de su interferencia en el ciclo bioquímico de Krebs, que causa una acumulación fatal de ácido cítrico.

Halocarburos en animales superiores

Aunque sin la profusión en que plantas y animales marinos lo hacen, los artrópodos y los vertebrados sintetizan también sustancias organohalogenadas. Las hembras de más de una docena de especies de garrapatas producen 2,6-diclorofenol, una feromona sexual. La cucaracha alemana sintetiza otro par de feromonas cloradas para inducir la agregación. El cloroformo, empleado en anestesia a mediados del siglo XIX y convertido ahora en disolvente industrial, tiene varias fuentes naturales: entre ellas destacan las termitas, que emiten un 15 por ciento del cloroformo atmosférico global, tal vez un producto residual de los compuestos clorados presentes en la madera.

Epipedobates tricolor, rana venenosa de Ecuador, segrega una sustancia clorada de gran interés farmacológico, la epibatidina, de estructura singular. Su efecto calmante es 500 veces más potente que el de la morfina. Ello ha motivado la síntesis industrial de compuestos análogos, en busca de nuevos analgésicos. Quizás el propósito original de esta molécula sea disuadir a posibles predadores.

Nuestro propio organismo produce tiroxina, una hormona que contiene yodo y regula el metabolismo basal. Durante una centuria se pensó que era el único organohalogenado fabricado por el cuerpo humano, hipótesis desmentida por la investigación reciente. Sintetizamos también cloro gaseoso y ácido hipocloroso. Los leucocitos se sirven del cloro y de la enzima mieloperoxidasa para acabar con microorganismos patógenos y posiblemente células tumorales. Este proceso de cloración —en el que se liberan proteínas y ácidos nucleicos clorados— resulta esencial para nuestro sistema inmunitario: los individuos con deficiencia de mieloperoxidasa quedan expuestos a las infecciones bacterianas, en particular a las neumonías. De los escasos bromuros orgánicos sintetizados por las células humanas, el primero en descubrirse fue un éster bromado del líquido cefalorraquídeo que induce el sueño REM (movimiento rápido del ojo).

Rocas y fuego

Los organismos utilizan de un modo preeminente cloruros y bromuros orgánicos, si lo comparamos con el uso de otros halocarburos. Sin embargo, el halógeno más abundante en la corteza terrestre es el flúor. Los volcanes emiten 11 millones de toneladas de fluoruro de hidrógeno y 3 millones de toneladas de cloruro de hidrógeno anuales. No resulta sorprendente, pues, que a las altas temperaturas y presiones que



5. LOS GASES VOLCANICOS, como los que emite el cono Pu'u'O'o del volcán hawaiano Kilauea (*izquierda*), contienen numerosos compuestos organohalogenados: por ejemplo el CFC-11, que fuera utilizado como refrigerante antes que se relacionara con la destrucción del ozono estratosférico.

se dan en las profundidades de la Tierra, la turba y otros materiales orgánicos se combinen con minerales que contienen cloro y flúor para formar halogenocarburos. Los volcanes de al menos cuatro continentes (Asia, Europa, Norteamérica y Sudamérica) emiten estos gases organoclorados y organofluorados naturales. Algunos de ellos son idénticos a los CFC antropogénicos que catalizan la degradación del ozono estratosférico.

En la litosfera, los halogenuros orgánicos aparecen en forma de bolsas de gas o integrados en ciertos minerales. Algunas rocas liberan cloruro de metilo, diclorometano, cloroformo, tetracloruro de carbono y otros compuestos clorados durante la etapa de trituración en el proceso de extracción minera. Sólo la extracción de la sal de potasio libera miles de toneladas anuales de cloroformo. Algunos minerales de fluorita contienen tetrafluoroetileno, el precursor del teflón. Un inconfundible olor a flúor emana de una fluorita violeta oscura de Baviera cuando se tritura; los mineros locales la denominan "stinkspat" (espato apestoso). Pero los halógenos no están confinados a la química de nuestro planeta. Hay, en el espacio interestelar, cloruro de hidrógeno y fluoruro de hidrógeno; en cuatro meteoritos al menos se han detectado compuestos clorados.

Una notable proporción de organohalogenados no biogénicos proviene de la combustión de biomasa que se produce en los incendios forestales y agrícolas. Sólo el 10 por ciento de estos incendios se deben a rayos u otras causas naturales; la mayoría son provocados por el hombre. En ellos se liberan grandes cantidades de cloruro de metilo (900.000 toneladas anuales) y cantidades menores de bromuro de metilo (de 10.000 a 50.000 toneladas anuales). La aportación global de cloruro de metilo atmosférico se estima en 4 millones de toneladas anuales, cifras que superan con creces las 10.000 toneladas provinentes de la industria.

Síntesis y degradación

¿Cómo procede la naturaleza en la producción de estos compuestos? ¿Cómo se desarrollan los ciclos de los halógenos biogénicos? Los haluros (sales), precursores de los correspondientes halógenos, están presentes en cantidades ingentes. En los océanos hay disueltos unos 27.000 billones de toneladas de cloruros y 89 billones de toneladas de bromuros; la corteza terrestre contiene 45.000 billones de toneladas de cloruros y 190 billones de toneladas de bromuros.

Las bromoperoxidasas (BPO) y las cloroperoxidasas (CPO), enzimas comunes, desempeñan una función esencial en el ciclo de su respectivo halógeno. En combinación con el peróxido de hidrógeno, oxidan el bromuro y el cloruro para formar hipobromito e hipoclorito (que en una solución acuosa da lugar a ácido hipocloroso, o lejía) respectivamente. De 94 especies de algas rojas, 71 muestran actividad de las BPO, enzimas presentes también en numerosas diatomeas marinas. Otra fuente de cloro libre es la oxidación, por medio del ozono, del aerosol marino que cubre la superficie de los océanos. Determinadas reacciones subsecuentes con sustancias orgánicas producen compuestos organoclorados.

La biocloración constituye una etapa clave en el reciclaje de la materia orgánica vegetal. Se estima que, cada año, 63.000 millones de toneladas de masa vegetal se degradan para convertirse en ácido húmico, que las cloroperoxidasas transforman, en presencia de cloruro sódico, en ácido húmico clorado. Esta compleja sustancia polimérica sufre una profunda degradación: primero en clorofenoles y luego en ácidos cloroacéticos y cloroformo. Los clorofenoles se dimerizan para formar dioxinas en un proceso que ocurre de forma natural en el suelo de las turberas de New Brunswick, en los bosques de abetos Douglas en Suecia y también en medios más prosaicos como el abono orgánico, los sedimentos de las aguas residuales y los excrementos de vacuno.

Esta secuencia de reacciones químicas se ha reproducido artificialmente en el laboratorio. Se han aislado ácidos húmicos clorados de un reservorio de agua de 5200 años de antigüedad y de materia orgánica de 35.000 años de antigüedad. Se han identificado también compuestos organoclorados en lignito de hace 15 millones de años (Terciario) y en muestras de carbón vegetal de hace 300 millones de años. Las cianobacterias, productoras de un gran

RICHARD HOBLIFF USGS (*arriba*); CHRIS BRODIE *Sigma Xi* (*estructura química*)/*American Scientist*



6. LAS HEMBRAS de 14 especies de garrapatas, entre ellas la garrapata del perro americano *Dermacentor variabilis*, producen 2,6-diclorofenol, una feromona. El isómero 2,4-diclorofenol corresponde a un herbicida de amplio espectro (uno de los dos ingredientes principales del "agente naranja", el defoliante utilizado en la guerra de Vietnam).

número de sustancias organocloradas, existen desde hace miles de millones de años. Por consiguiente, los organohalogenados han estado presentes desde la aparición de la vida en la Tierra; sin duda, precedieron la llegada de nuestra especie.

Aplicaciones terapéuticas

Los humanos vienen extrayendo y usando compuestos organohalogenados desde hace milenios. El púrpura de Tiro, un colorante bromado análogo al azul índigo, se obtenía del *Murex*, un molusco del Mediterráneo. Aparecen referencias de su producción en la ciudad fenicia de Tiro en textos que datan aproximadamente del 1600 a.C. ("Fenicia" viene del griego "púrpura"). Este raro colorante de color brillante se convirtió en uno de los primeros y principales productos básicos del emporio comercial fenicio; más tarde fue adoptado como símbolo de realeza entre los romanos, los egipcios y los persas.

Los organohalogenados naturales encierran un enorme potencial terapéutico para la humanidad. Los efectos antibióticos de la vancomicina, por ejemplo, pueden salvar vidas: a menudo constituye el último recurso para defenderse contra bacterias que han desarrollado resistencia a diversos fármacos. La telfairina, un metabolito clorado producido por algas marinas, es un insecticida contra los mosquitos tan potente como el lindano (hexacloruro de benceno), un compuesto criticado por su supuesta toxicidad para los humanos. El maracén, un metabolito fúngico clorado con propiedades antibióticas, se muestra activo contra las micobacterias, agentes de la tuberculosis. La punaglandina, también clorada y proveniente de un coral blando del Pacífico Sur, ofrece una poderosa actividad antitumoral; quizá pronto encuentre una aplicación clínica.

La criptoficina, un compuesto organoclorado derivado del alga *Nostoc*, una cianofícea, ofrece mayor eficacia que los anticancerígenos comerciales Taxol o la vinblastina en sus primeras pruebas. Se están llevando a cabo ensayos clínicos de por lo menos un compuesto sintético análogo. La presencia de cloro resulta crítica para las propiedades farmacológicas de esta molécula —la sustracción del halógeno reduce de forma notable su actividad—. La espongistatina 9, un metabolito espongiario clorado, ha resultado uno de los compuestos más potentes de los hasta ahora analizados entre 60 líneas de células tumorales en el estadounidense Instituto Nacional del Cáncer. Otros organohalogenados inhiben virus, entre ellos el VIH.

En su búsqueda de fármacos potenciales, los expertos en química de productos naturales descubren entre 100 y 200 nuevos compuestos orgánicos halogenados cada año, principalmente de fuentes marinas. Pero de las 500.000 especies de animales, plantas y bacterias marinas estimadas, sólo se ha examinado un pequeño porcentaje; miles de compuestos naturales organohalogenados esperan ser descubiertos. En el caso de los primitivos briozoos, por ejemplo, se han detectado distintos compuestos orgánicos halogenados en la mayoría de las varias decenas de especies que se han analizado; quedan todavía otras 3900 por examinar.

OH
Cl Cl
2,6 diclorofenol

OH
Cl
Cl
2,4 diclorofenol

Riesgo ambiental

El carbono, el hidrógeno, el oxígeno, el nitrógeno y otros elementos de la vida forman parte de nuestro entorno natural. También los halógenos. Lo mismo que muchas otras sustancias constituyentes de los seres vivos, los compuestos oganohalogenados biogénicos desempeñan funciones esenciales para la supervivencia de los organismos. Junto con otras biomoléculas, las hormonas halogenadas y las sustancias de defensa han evolucionado bajo la presión de la selección natural para desarrollar funciones específicas.

Con todo, la abundancia de organohalogenados naturales no implica que sus análogos sintéticos sean siempre benignos, como si "natural" fuera sinónimo de "inofensivo". En realidad, los compuestos que contienen halógenos son a menudo biológicamente activos, según corroboran distintos ejemplos aludidos en el artículo. Harto conocido es el daño ambiental que causan los CFC, los halones, los disolventes clorados, el DDT, los PCB, las dioxinas y otros halocarburos.

JIM KALISCH Dpto. Entomología, Universidad de Nebraska (*dermacentor*); CHRIS BRODIE *Sigma Xi* (*estructura química*)/*American Scientist*



epibatidina



vancomicina

7. VARIOS FARMACOS DE INTERES corresponden a compuestos organohalogenados naturales. La rana venenosa *Epipedobates tricolor* secreta epibatidina, un analgésico 500 veces más potente que la morfina (*arriba*). La vancomicina, un antibiótico, se extrae de *Streptomyces orientalis* (ahora *Amycolatopsis orientalis*), un pariente del *Streptomyces coelicolor* (*abajo*). La complejidad de los metabolitos tiene poco que ver con la de las especies que los sintetizan.



La existencia de versiones naturales de algunos halocarburos antropogénicos hace necesaria una revisión de los riesgos ambientales, una evaluación más amplia, que no dependa del origen de las sustancias. Cuando la suma de los organohalogenados naturales y antropogénicos constituya un riesgo inaceptable, la contribución humana deberá reducirse. Ello requiere conocer cuál es la proporción industrial y cuál la de la naturaleza, una labor que demanda una mayor comprensión de las fuentes y sumideros biogeológicos de estos compuestos.

El autor

Gordon W. Gribble es profesor de química orgánica y ambiental en el Instituto Dartmouth. Su investigación se centra en la síntesis orgánica y los productos naturales. Desde 1990 se dedica al estudio de los organohalogenados naturales.

Bibliografía complementaria

THE DIVERSITY OF NATURALLY PRODUCED ORGANOHALOGENS. G. W. Gribble en *Natural Production of Organohalogen Compounds*. Dirigido por G. W. Gribble. Springer-Verlag; Nueva York, 2003.

THE DIVERSITY OF NATURALLY OCCURRING ORGANOHALOGEN COMPOUNDS. G. W. Gribble en *Chemosphere*, vol. 52, págs. 289-297; 2003.

Marc Boada

Péndulo gravimétrico

Según el relato apócrifo, descansando en el campo Isaac Newton (1642-1727) tuvo la genial idea de relacionar la caída de una manzana con el comportamiento de la Luna, aparentemente inmóvil en el horizonte. ¿Por qué la manzana cae y la Luna no? ¿Por qué un cuerpo cae sobre otro? Hoy podemos responder a estas cuestiones diciendo que todo cuerpo genera un campo gravitatorio cuya intensidad es proporcional a su masa multiplicada por la constante de la gravitación universal G ($6{,}6742 \times 10^{-11}$ $m^3kg^{-1}s^{-2}$). El campo gravitatorio que crea la Tierra (g) varía de un punto a otro de su superficie (debido a que el planeta no es esférico y a otros factores geofísicos) y también con el tiempo (debido a factores astronómicos).

En gravimetría suele utilizarse una unidad tradicional, el gal, llamada así en honor de Galileo, que vale 1 cm/s^2. El valor aproximado de g, en la superficie de nuestro planeta, es de 980 gal.

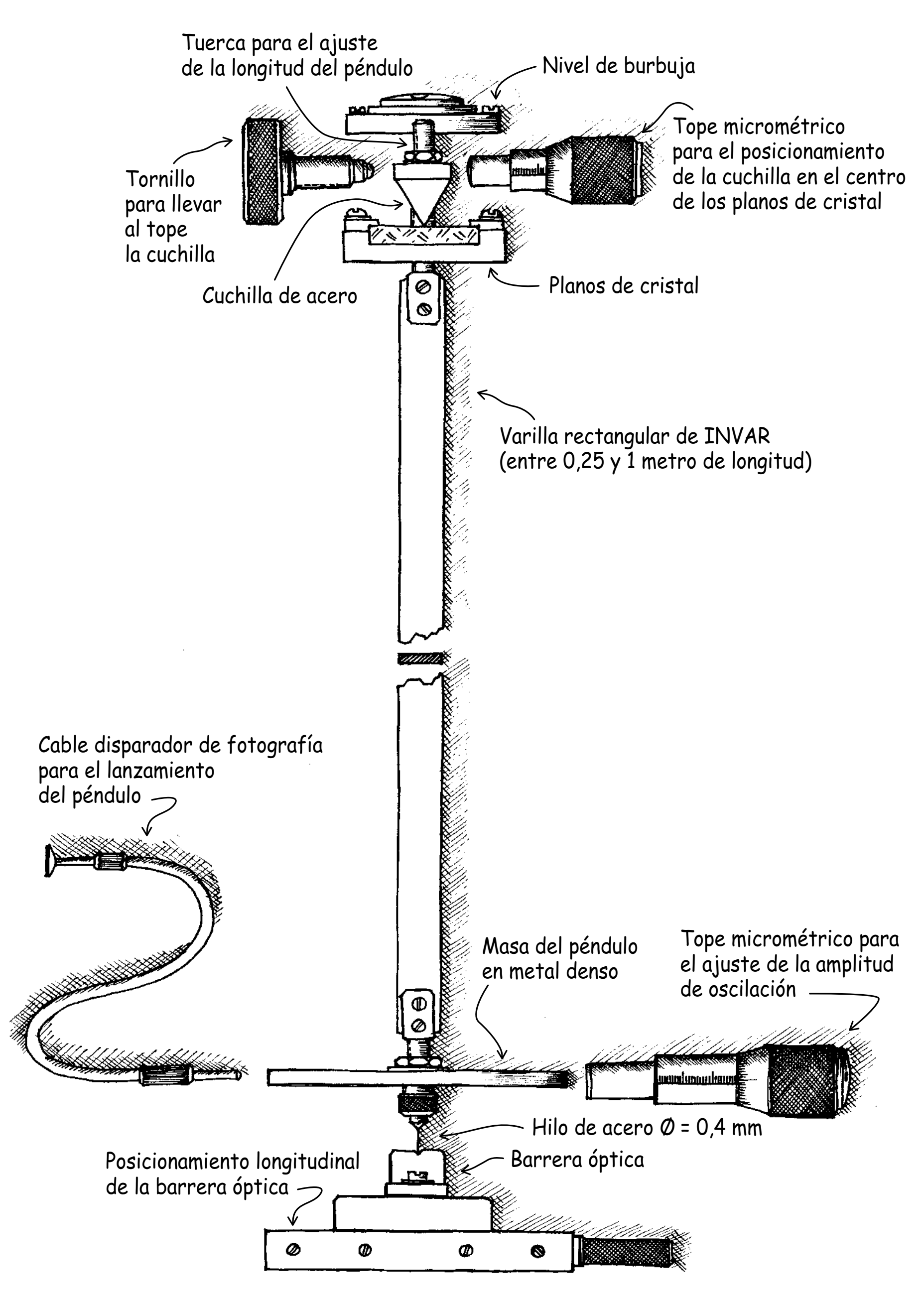
Distintos instrumentos permiten medir g: péndulos, balanzas de torsión (como la utilizada en 1798 por Henry Cavendish, en un experimento que determinó G con notable exactitud), gravímetros de muelle (donde se controla el alargamiento de éste), reflectores en alto vacío (capaces de detectar en su caída las deformaciones, por fuerzas de marea, de la corteza del planeta) o aparatos que miden las fluctuaciones de un campo magnético. Para el constructor aficionado, se recomienda recurrir al péndulo.

Determinar el valor de g con precisión requiere el empleo de gravímetros absolutos. Estos dispositivos experimentales se sirven de un método que guarda una estrecha semejanza con la caída de la manzana: mediante un interferómetro láser miden la aceleración que experimenta un cilindro de cuarzo cuando cae en el vacío. En razón de tan depurados requerimientos instrumentales, el valor absoluto de g se conoce sólo en determinados puntos geográficos, que configuran las redes gravimétricas absolutas: la española RGFE73 y la internacional IGSN71 ("International Gravity Standard Net"), por ejemplo.

Un péndulo, por sí solo, no permite determinar g con tanta precisión.



Péndulo gravimétrico de 450 milímetros de altura y 5 kilogramos de peso. El período de una oscilación completa es de un segundo.



La medición de la gravedad con un péndulo se basa en una razón: el cuadrado de su período (*p*) es inversamente proporcional a *g*. Para obtener *g* a partir de *p*, sólo hay que conocer el valor de esa constante de proporcionalidad (*c*). La deducción teórica del valor de *c* resulta harto compleja, dado que el movimiento del péndulo depende de numerosos factores (*véase el recuadro* "La ecuación del péndulo"). Por ello se recurre a una determinación experimental: para conocer *c* con precisión, se efectúa una medición de *g* en un punto de gravedad ya sabida. Si conocemos *g* en ese punto y el período del péndulo, la obtención de la constante de proporcionalidad es directa.

Así, la utilización del péndulo gravimétrico requerirá siempre una calibración previa del mismo en una estación de la red local gravimétrica. (Para conocer la localización de estas estaciones, consúltese el Instituto Geográfico Nacional.) Una vez calibrado, podremos utilizarlo para observar fluctuaciones de *g* en función de la posición del Sol y de la Luna respecto de la Tierra, verificar la disminución de *g* con la altitud o comprobar que en determinados territorios la gravedad real se aparta del valor calculado únicamente a partir de la latitud geográfica y la altura.

Antaño, el funcionamiento del gravímetro pendular exigía ajustar la longitud (*L*) de un péndulo hasta que éste batía segundos (es decir, hasta que realizaba una oscilación en un segundo). Una vez ajustada, esto es, conocida *L*, la determinación de *g* se infería de la ecuación que describe el movimiento del péndulo simple ideal, donde la constante *c* es simplemente *L*. Así se obtuvieron los primeros valores de la aceleración de la gravedad, los que sugirieron que la Tierra no era esférica y que su forma real se acercaba a la de un geoide. Con el advenimiento de la electrónica, resulta más fácil operar a través del proceso inverso: se construye un péndulo de longitud constante y se mide su período mediante un oscilador de cuarzo. Con el nuevo dispositivo se aprecian fluctuaciones inferiores a la diezmilésima de segundo.

Cuando se plantea la construcción de un péndulo gravimétrico, deben considerarse las posibles perturbaciones que le acechan. Para minimizar los efectos térmicos, fabricaremos una cabina o armario termostatizado que proteja el aparato, o bien utilizaremos en su construcción materiales con coeficientes de dilatación mínimos o compensados entre sí. Una buena opción para la gravimetría expedita, donde el transporte impide o dificulta el control térmico, consiste en construir la varilla del péndulo con INVAR, una aleación de hierro con un 36 por ciento de níquel y un bajo coeficiente de dilatación.

La fricción, aerodinámica e interna (entre la cuchilla y su soporte), es responsable del rápido amortiguamiento de las oscilaciones. Debe, pues, anularse en lo posible. Ello se consigue construyendo la masa del péndulo con algún material de densidad elevada, superior a 8 o 9 gramos por centímetro cúbico, siendo quizás el tungsteno el más adecuado. (Yo utilizo un disco de este metal de 70 milímetros de diámetro y 2 milímetros de espesor, recortado mediante electroerosión de hilo, con un peso de unos 150 gramos.) Luego se mecaniza la masa para darle una forma aerodinámica: una esfera o mejor un disco lenticular que pueda disponerse horizontal.

Para la construcción de la cuchilla y su apoyo se requiere un gran dominio de las técnicas del lapidario. Si bien el ágata u otras piedras duras resultan apropiadas, el acero ofrece mayor comodidad. A partir de un acero de cementación (se recomienda el material número 1.7131 y código DIN16MnCr5, que combina cromo y manganeso), se obtiene una preforma mediante fresado endurecido por cementación y rectificado; luego, se pule frotando sobre un grueso cristal en el que habremos espolvoreado pulimento para metales. El resultado final debe ser un filo recto y agudo con un radio de curvatura mínimo, sin mellas ni rozaduras. Para verificar la rectitud de la arista se recomienda producir tres unidades y compararlas dos a dos, filo contra filo, observando a través de las mismas una fuente luminosa extensa. Permutando las cuchillas podremos escoger la mejor de las tres. El apoyo lo realizaremos mediante dos rectángulos de cristal grueso, perfectamente planos.

Respecto a la longitud del péndulo, en una primera aproximación se observa que cuanto mayor es su valor, menor es el efecto de las perturbaciones. Tradicionalmente se han usado péndulos que efectuaban una semioscilación en un segundo, pero su construcción es delicada; presenta problemas de flexión y torsión, entre otros. Personalmente, opté por perfeccionar en sucesivos prototipos un péndulo de un cuarto de metro de longitud, con un período de oscilación de un segundo.

El péndulo deberá oscilar con amplitudes inferiores al grado sexagesimal. Para sustentarlo, construiremos un soporte que ofrezca rigidez al sistema. (En modelos refinados pueden hacerse oscilar dos péndulos en oposición, compensando cada uno el arrastre del soporte por parte del otro; pero en aparatos de menor tamaño, la mejor opción consiste en rigidizar la columna.) Si queremos construir un dispositivo transportable, deberemos limitar el peso. Lo mismo sirve para la base del artefacto, que, además, deberá permitir una perfecta nivelación, para conseguir la total horizontalidad.

Veamos los componentes del sistema de medición. En la parte inferior del péndulo, un fino hilo de acero atraviesa una barrera óptica que detecta su paso. En paralelo, un cristal de cuarzo termostatizado (que oscila a 16 megahertz, con errores de sólo partes por millón) emite impulsos que un contador digital compara con las señales de la barrera óptica. Esta incluye un emisor y un receptor de infrarrojo. Los modelos más comunes de barreras ópticas permiten discriminar perfectamente el tiempo de paso del hilo; captan incluso la difracción producida por éste, que aparece en forma de pico secundario a un lado y otro de la señal principal. Para eliminar este ruido, un circuito integrado programable se encarga de filtrar la señal: sólo admite los picos cuya intensidad es igual o superior a un umbral determinado. El mismo circuito contabiliza los pulsos del oscilador de cuarzo entre paso y paso del péndulo.

La precisión del péndulo está limitada por dos factores intrínsecos: la barrera óptica y el hilo de acero. La barrera ofrece tiempos de detección más lentos que el oscilador de cuarzo; el hilo de acero no puede adelgazarse indefinidamente ya que se flexiona por fricción aerodinámica, que varía en función de la presión atmosférica. Por fin, se programa el circuito para mostrar en una pantalla el período del péndulo por oscilación o por paquetes de oscilaciones (10, 100 o 1000 oscilaciones). Ello permite caracterizar el amortiguamiento característico del aparato.

Para accionar el dispositivo nos serviremos de un tornillo micrométrico. Utilizaremos también un cable disparador de fotografía para apartar la masa de la vertical hasta que alcance el tornillo micrométrico, momento en que la liberaremos. Con la adición de un nivel de burbuja, un microscopio con retículo para estimar la amplitud de la oscilación y un termómetro digital para extrapolar las perturbaciones térmicas irreductibles, tendremos el instrumento listo para su ensayo.

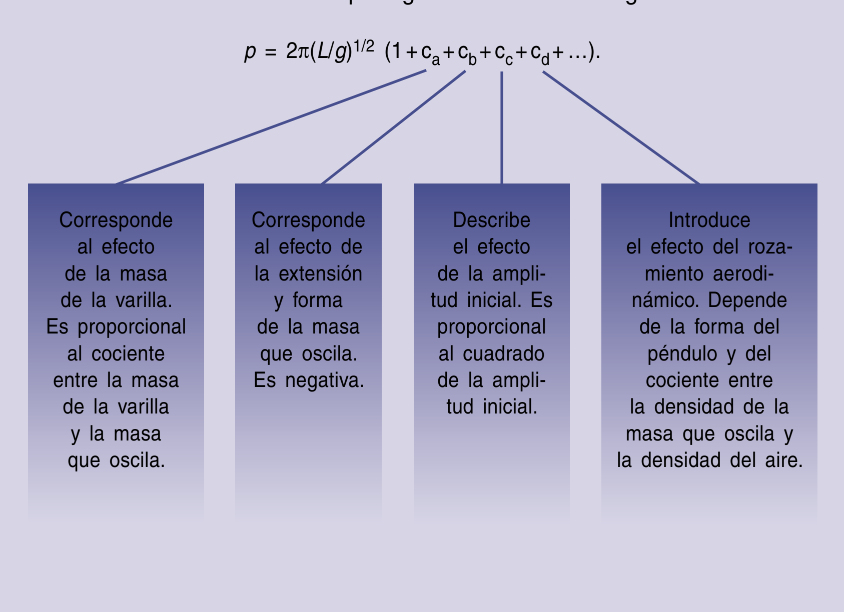
LA ECUACION DEL PENDULO

En un péndulo simple ideal, la masa puntual suspendida de un hilo rígido y sin peso oscila libremente en el vacío y sin rozamiento; desarrolla un movimiento armónico simple. El período (p) de este péndulo ideal depende sólo de la aceleración de la gravedad (g) y de la longitud (L) del mismo:

$$p = 2\pi(L/g)^{1/2}.$$

Si queremos aproximarnos a la realidad, debemos añadir varias correcciones. Describimos aquí algunas de las más significativas:

$$p = 2\pi(L/g)^{1/2}\ (1 + c_a + c_b + c_c + c_d + \ldots).$$



Juan M.R. Parrondo

¿Amigos para siempre?

Desde que John von Neumann y Oskar Morgensten crearan la teoría de juegos en los años cuarenta, se intenta utilizar las matemáticas para estudiar un asunto tan sinuoso e impreciso como las relaciones humanas. Se crean modelos que simplifican los conflictos reales, pero aún retienen sus aspectos esenciales. Uno de los ejemplos clásicos es el *dilema del prisionero*, que probablemente sea conocido por muchos lectores de *Investigación y Ciencia*.

Recordemos la formulación original del dilema. La policía arresta a dos sospechosos de un robo. No hay pruebas suficientes para condenarlos por ese delito, sino sólo por uno menor, como la posesión ilegal de armas. Ante esta situación, el juez ofrece a cada uno de los dos sospechosos, y por separado, el siguiente trato: “Si tú confiesas y tu cómplice no lo hace, él será condenado a 10 años de cárcel por el robo mientras que a ti te perdonaremos y saldrás libre mañana. Si él confiesa y tú callas, tú pasarás los 10 años en la cárcel y él quedará libre. Si ninguno de los dos confiesa, os encerraremos por posesión de armas 1 año. Finalmente, si ambos confesáis, seréis condenados a 6 años de cárcel”. Cada uno de los prisioneros se enfrenta a un peliagudo dilema: “Si callo, puede que me caigan 1 o 10 años, mientras que si confieso puedo salir libre o pasar 6 años en la cárcel. Mi compañero estará pensando lo mismo y lo más probable es que me delate. Por lo tanto, voy a confesar.” Razonando de esta forma, ambos prisioneros confiesan y obtienen una pena considerable: 6 años. Si confiaran en la lealtad del compañero, callarían ambos y saldrían bastante bien parados, con sólo 1 año de condena. Pero esta confianza debe ser muy sólida. Si yo supongo que mi compañero me va a ser fiel, ¿por qué no delatarle y salir libre? O peor aún: ¿no caerá él en esta misma tentación y me delatará? Si lo hace pasaré 10 años entre rejas. Luego, lo mejor es prevenir esta situación y confesar. Parece que delatar es la estrategia más segura y, sin embargo, no es la óptima para el conjunto de los dos sospechosos. Si pudieran negociar entre ellos y dar de forma simultánea su respuesta ante el juez, lo más probable es que acordaran callar.

El dilema del prisionero es un ejemplo muy simplificado de una situación común entre personas y organizaciones. Por ejemplo, si falseo mi declaración de la renta para pagar menos impuestos y el resto de los ciudadanos es honrado, está claro que obtengo un cierto beneficio económico, siempre que no me descubran. Pero si todos los contribuyentes defraudasen, los ingresos del estado se reducirían de modo que todos saldríamos perjudicados. Este caso es más complejo que el dilema del prisionero, porque involucra muchas personas en lugar de sólo dos, pero se observa el mismo fenómeno: el defraudador gana solamente si es el *único* insolidario.

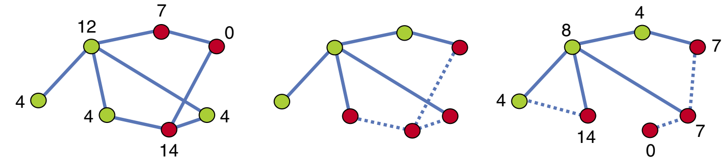
El dilema ha dado lugar a un gran número de trabajos de investigación e incluso se han celebrado torneos en donde compiten programas de ordenador. En el primero de estos torneos resultó ganadora una estrategia de la mayor simplicidad: hacer exactamente lo que ha hecho el contrario en el turno anterior. A pesar de que venciera esta estrategia tan ecuánime, un análisis matemático del dilema del prisionero jugado un gran número de turnos muestra que los jugadores “racionales”, es decir, jugadores que tratan de minimizar sus pérdidas, tenderían a defraudar constantemente. En los años noventa, Martin A. Nowak y Robert M. May colocaron a un gran número de estos jugadores racionales en las casillas de un tablero, de modo que cada uno de ellos jugara con sus cuatro vecinos y cambiara de estrategia imitando al vecino más exitoso. Descubrieron que en este caso sí pueden existir de forma estable regiones en donde todos los jugadores cooperan. En 1995, Nowak, May y Sigmund publicaron en nuestra revista un análisis detallado de este modelo.

Más recientemente, los físicos del Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA) Víctor M. Eguiluz, Martín G. Zimmermann y Maxi San Miguel, junto con el filósofo de la Universidad de las Islas Baleares Camilo J. Cela-Conde, han utilizado el dilema del prisionero para crear un modelo simple de organización social en el que la cooperación es también estable. Para analizarlo, es más conveniente formular el dilema como un juego en el que cada uno de los dos jugadores gana puntos en lugar de años de cárcel. En la tabla siguiente se muestra la puntuación del jugador 1 en cada una de las cuatro posibles situaciones (la puntuación del jugador 2 es la misma sin más que cambiar filas por columnas):

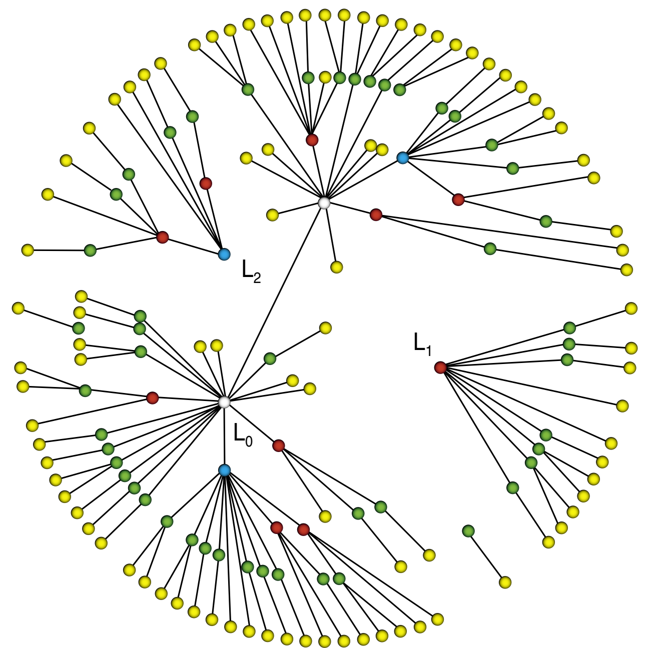
		ESTRATEGIA DEL JUGADOR 2	
		COOPERAR	DEFRAUDAR
ESTRATEGIA DEL JUGADOR 1	COOPERAR	4	0
	DEFRAUDAR	7	0

En el modelo del grupo del IMEDEA, un gran número de individuos juegan por parejas que se deciden inicialmente al azar. Cada jugador tiene una estrategia: o bien coopera o bien defrauda, que también se elige inicialmente al azar. Como en el sistema de Nowak y May, los jugadores “ven” lo que ha ganado cada uno de sus vecinos y copian la estrategia del que tiene mayor puntuación (los empates se deshacen eligiendo la estrategia al azar). En la figura 1, se puede ver cómo cambian las estrategias en el primer turno (*dibujo del centro*). El lector puede comprobar que, si sólo se aplicaran estas reglas de imitación, la red de la figura 1 acabaría alternando entre dos configuraciones de estrategias en las que conviven jugadores que cooperan y jugadores que defraudan.

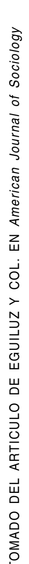
Pero el modelo es más interesante si permitimos también a cada jugador escoger “sus amigos”, es decir, a aquellos individuos con los que juega. Está claro que



1. Una posible configuración de 6 jugadores que cooperan (*círculos verdes*) o defraudan (*círculos rojos*). En el dibujo de la izquierda se muestra la configuración inicial y las puntuaciones obtenidas en el primer turno. El dibujo central muestra las nuevas estrategias y se han punteado los enlaces "no deseados". En el dibujo de la derecha observamos que dos de estos enlaces han cambiado mientras que uno permanece.



2. Estructura social estacionaria de "cooperantes".



dos jugadores que cooperan estarán satisfechos de estar emparejados. Por otro lado, cualquier jugador querrá "romper relaciones" con otro que defrauda. El modelo admite esta posibilidad de la siguiente forma. Si el más exitoso de los vecinos de un jugador A es un defraudador B, entonces el jugador A rompe su relación con B con una probabilidad p y establece una nueva relación con otro individuo de la sociedad elegido al azar. Observemos que A será siempre un defraudador, porque si no lo era antes de ese turno, en el proceso de copia de estrategias exitosas habrá imitado el comportamiento defraudador de B. Con esta regla la red de conexiones cambia en cada turno, como lo hace en la vida real nuestra red de amistades o colaboraciones, una propiedad de las redes sociales que se denomina *plasticidad social* y que en el modelo puede regularse variando la probabilidad p de ruptura de relaciones.

La plasticidad social diseñada por el grupo del IMEDEA hace que los defraudadores se queden más y más solos, pero a la vez los defraudadores que aparecen por imitación pueden dar con nuevas "víctimas" y aumentar sus ganancias. En la figura 1 podemos ver que el jugador que en el primer turno tenía 14 puntos ha sido imitado por dos cooperadores que han roto sus relaciones con él, bajando hasta 0 su puntuación en el segundo turno. Pero también un jugador que inicialmente cooperaba se ha vuelto defraudador aumentando su puntuación de 4 hasta 14 puntos.

El modelo tiene un comportamiento bastante complicado, pero se pueden deducir algunas de sus propiedades. Por ejemplo, una situación en donde todos cooperan o defraudan es estable porque no hay nadie diferente a quien imitar. No obstante, en el caso en que todos defraudan, las estrategias no cambian, pero sí lo hará constantemente la red, puesto que se estarán rompiendo y creando relaciones sin cesar.

¿Existen configuraciones estables en donde convivan jugadores que cooperan y defraudan? Sí, pero para ello son necesarias ciertas condiciones. La primera es que no puede haber enlaces entre defraudadores, porque acabarían rompiéndose en algún momento. La segunda es que, si un jugador C que coopera está jugando con un defraudador D, entonces la puntuación de C debe ser menor que la de D (si no fuera así D imitaría a C) y, además, C debe tener como vecino a otro jugador L que coopera y que tiene mayor puntuación que D (si no fuera así, C imitaría a D). Es decir, los defraudadores son estables si "explotan" a jugadores que cooperan y tienen una puntuación baja pero que tienen como vecinos a "cooperantes exitosos".

Las configuraciones estacionarias están entonces formadas por 3 tipos de jugadores: los *líderes*, que son jugadores que cooperan, tienen un gran número de conexiones con otros cooperantes y por ello alcanzan la máxima puntuación entre todos sus vecinos; los *conformistas*, que cooperan, tienen una puntuación menor que alguno de sus vecinos cooperantes, pero no cambian de estrategia; y los *explotadores*, que son defraudadores que juegan con uno o más conformistas que no rompen relaciones con ellos porque tienen también como vecino a un cooperante más exitoso que el propio explotador. En la figura 2 se puede ver la red social que se alcanza cuando se simula en el ordenador el modelo con 10.000 jugadores y una plasticidad $p = 0{,}1$. En la figura sólo se muestran los cooperantes más exitosos. Vemos que aparecen tres líderes, L_0, L_1 y L_2, siendo el primero de ellos el que obtiene mayor puntuación. Según nos alejamos del centro del círculo, los cooperantes tienen menos conexiones y su puntuación es más baja. Como ya hemos dicho, los explotadores, que no se muestran en la figura 2, "cuelgan" de algunos cooperantes que no son líderes y tienen puntuaciones intermedias.

El trabajo del grupo del IMEDEA profundiza mucho más en este modelo. Por ejemplo, muestra cómo la fracción de explotadores aumenta cuando se reduce la plasticidad social. El mismo grupo de investigación ha estudiado la influencia de la plasticidad social en otro modelo que intenta reproducir la difusión de rasgos culturales entre la población, el llamado *modelo de Axelrod*; se demuestra con ello que la plasticidad puede estabilizar un cierto grado de diversidad cultural. Los lectores interesados en este y otros problemas de *matemática social* pueden visitar la página web del grupo: http://www.imedea.uib.es/physdept/eng/lines/social.html

Mark Fischetti

AURICULARES ANULADORES DEL RUIDO

Reducir el estruendo

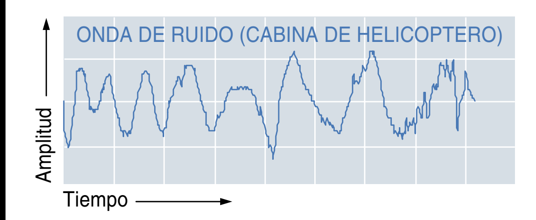
A bordo de un reactor comercial, los motores aturden a los pasajeros con un zumbido de 75 a 80 decibelios. En metros, trenes y coches acelerados nos acosan fragores implacables. Ponerse unos auriculares y subir el volumen de un reproductor de CD al objeto de ahogar el estruendo sólo sirve para aumentar el castigo sobre nuestros oídos.

Los tapones hondos y las orejeras de los trabajadores industriales reducen por lo general el ruido entre 15 y 25 decibelios, pero son incómodos y no permiten escuchar a bordo de un avión una película, un canal musical o el reproductor de música propio. Mejor van los auriculares reductores de ruido. Los modelos más avanzados están hechos de materiales estructurales que bloquean pasivamente el ruido de alta frecuencia (por encima de unos 200 hertz). La anulación de los ruidos de baja frecuencia, difíciles de detener de otro modo, es activa, mediante un circuito electrónico y un altavoz. Dentro de cada auricular, un micrófono capta las ondas sónicas que atraviesan el casco externo y un altavoz crea ondas de presión que las contrarrestan. Puede entonces introducirse a voluntad música a un volumen confortable.

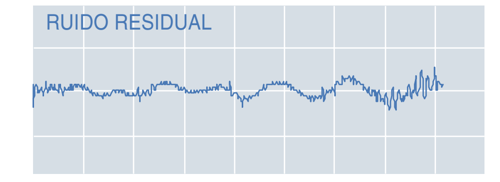
Los mejores modelos reducen pasivamente el ruido entre 15 y 25 decibelios; encendiendo el circuito activo, se recortan otros 10 o 15 decibelios de tonos de baja frecuencia. El micrófono, el circuito y el altavoz internos —que constituyen un sistema retroalimentado— deben crear unas ondas antagonistas lo bastante intensas y con rapidez suficiente para casi igualar al sonido en tiempo real. Un retraso de menos de 25 grados respecto al necesario desfase de 180 grados puede recortar el ruido en 20 decibelios. Unos auriculares de reacción más lenta son menos efectivos.

La electrónica puede también atacar algunos de los sonidos infiltrados de frecuencia media, con lo que los cascos pueden ser más ligeros o menos ajustados y, por tanto, más cómodos. Pero la atenuación de frecuencias superiores, entre 500 y 1000 hertz, sigue siendo difícil porque la parte mecánica dispone cada vez de menos tiempo para generar las ondas antagonistas. (Como referencia, el habla femenina media ronda los 225 hertz.) Se dispone de sistemas "sin retroalimentación" que captan el ruido fuera del auricular e introducen la señal antagonista, pero requieren una electrónica más compleja.

1. LA ONDA DE PRESION debida al ruido es anulada por interferencia destructiva; el altavoz crea una onda de amplitud similar pero desfasada 180 grados. El ruido está compuesto de un gran número de frecuencias.









SAMUEL VELASCO; FUENTE: BOSE CORPORATION

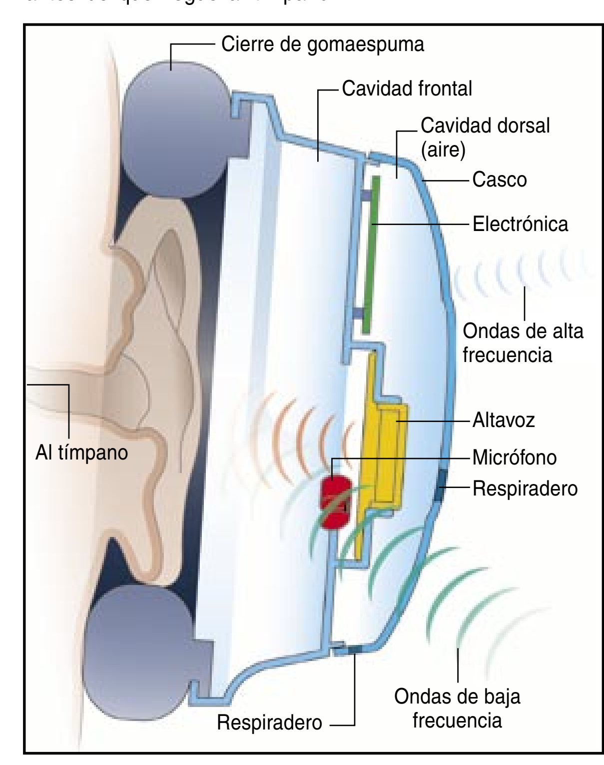
➤UN VIAJERO AGOTADO: En 1978, Amar Bose, fundador de Bose Corporation, sintió el primer impulso de fabricar auriculares supresores de ruido durante un molesto vuelo a baja altura desde Europa. Ya en la década de 1950, la Fuerza Aérea de EE.UU. había experimentado con auriculares de supresión activa, pero la invención en los años setenta del minúsculo micrófono de electretes abrió paso a dispositivos mucho más ligeros. Bose trabajó con clientes de las fuerzas aéreas y en 1989 empezó a vender unidades comerciales.

➤SORDERA: Según el Instituto Nacional de Higiene y Seguridad en el Trabajo una exposición prolongada a un sonido superior a los 85 decibelios puede dañar la audición. La investigación ha demostrado que un estruendo persistente aumenta la fatiga, eleva la tensión nerviosa e incluso alarga los efectos del desfase horario. La escala de decibelios es logarítmica: 50 decibelios es 10 veces más potente que 40 decibelios y suenan el doble de fuerte. Algunas muestras de nivel de decibelios: conversación, de 50 a 60; interior de un automóvil de cuatro cilindros en autopista, de 70 a 75; avión de pasajeros, clase turista, de 75 a 80; segadora de césped, 95; sierra de mesa, 105; concierto de rock, en los momentos de mayor intensidad, 110 a 120.

➤CABINAS SILENCIOSAS: Los ingenieros han intentado anular el ruido en todos los puntos de las cabinas de los aviones militares instalando micrófonos y altavoces en cada palmo del interior. Lograrlo requiere un gran número de altavoces, a menudo grandes, que ocupan espacio y consumen potencia; además, hay que contrarrestar la reverberación y las ondas estacionarias. En la práctica se han conseguido zonas silentes, pero no un silencio uniforme.



2. EN CADA AURICULAR, el casco y la almohadilla de gomaespuma atenúan el sonido de alta frecuencia. Las bajas frecuencias penetran y crean ondas de presión dentro de la cavidad frontal. Un micrófono percibe esas ondas y la electrónica hace que un altavoz emita ondas de signo contrario, de modo que se anule la variación de presión antes de que llegue al tímpano.



3. LOS RESPIRADEROS aumentan la eficacia del altavoz al evacuar el aire atrapado tras él. Para anular un ruido de 90 decibelios, el altavoz debe ser lo bastante potente para crear una onda de presión opuesta de intensidad comparable, una función de gran consumo, para la que es clave el rendimiento.

4. LA ELECTRONICA incorporada al casco recibe la señal de audio procedente de un CD, un reproductor MP3 o el brazo de un asiento de avión y ordena al altavoz no anular las frecuencias del ruido que coincidan con las frecuencias de audio sí deseadas.

Realidad última

¿accesible?

THE ROAD TO REALITY. A COMPLETE GUIDE TO THE LAWS OF THE UNIVERSE, por Roger Penrose. Jonatahn Cape; Londres, 2004.

SCIENCE AND ULTIMATE REALITY: QUANTUM THEORY, COSMOLOGY AND COMPLEXITY. Dirigido por John D. Barrow, Paul C. Davies y Charles L. Harper, Jr. Cambridge University Press; Cambridge, 2004.

THE PARTICLE ODYSSEY. A JOURNEY TO THE HEART OF MATTER, por Frank Close, Michael Marten y Christine Sutton. Oxford University Press, Oxford 2004.

FACTS AND MYSTERIES IN ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS, por Martinus G. Veltman. World Scientific; Singapore, 2003.

A la física podemos aproximarnos desde una doble óptica. O bien considerándola una disciplina científica autónoma, con sus contenidos y métodos, o bien identificándola con la explicación última de la realidad. Con ese segundo enfoque han venido apareciendo libros importantes de firmas señeras (Brian Greene, Stephen Hawking y muchos más). Prestigian esa tradición las recientes *The Road to Reality*, de Penrose, y el homenaje a John Wheeler presentado en *Science and Ultimate Reality*. Mas para acercarse a la naturaleza última de cuanto existe, necesitamos, como paso previo, conocer sus componentes indivisibles, cristalinamente descritos en *The Particle Odyssey* y en *Facts and Mysteries in Elementary Particle Physics*.

Sobre *qué* sea la realidad física y cuáles sus leyes reguladoras han venido reflexionando filósofos y científicos de todos los tiempos. Desde Galileo la respuesta se ha expresado en términos dinámicos, es decir, en la especificación del desarrollo seguido por un sistema físico en el transcurso del tiempo, a partir de un punto de partida prefijado. Esa trayectoria particular viene determinada por ecuaciones diferenciales. Objetos, sistemas y procesos del mundo se describen mediante modelos matemáticos.

Toda la materia consta de moléculas. Las moléculas son estados ligados de átomos, de los que se han observado 92 tipos diferentes. (El elemento 43, el tecnecio, no se da en la naturaleza.) En torno al núcleo de los átomos giran en órbitas los electrones, partículas descubiertas en 1897 por Joseph John Thomson. El tamaño de los átomos (el tamaño de la órbita externa de los electrones) es del orden de 1/100.000.000 cm; unas 100.000 veces menor, el núcleo. Eso significa que el átomo está, en buena parte, vacío, según descubriera en 1911 Ernest Rutherford al disparar contra el núcleo partículas alfa. Seis años antes, en 1905, Einstein propuso que la radiación electromagnética se hallaba cuantizada y aparecía sólo en paquetes de energía definidos, los fotones. La energía de los fotones depende del tipo de radiación electromagnética; los fotones de las ondas de radio portan una energía menor que los de luz visible; los fotones de luz roja, menor que los de luz azul; los fotones de rayos X, menor que los de rayos gamma.

En 1913 Niels Bohr realizó una descripción pormenorizada de los electrones en los átomos que daba feliz cuenta de los espectros de luz emitidos por ciertos átomos, el de hidrógeno en particular. El modelo de Bohr iniciaba una revolución en física de cuyas repercusiones nos beneficiamos todavía, la mecánica cuántica. La física del siglo veinte se construyó sobre dos pilares: la teoría general de la relatividad de Einstein, verificada con precisión, y la mecánica cuántica. La primera describe el universo macroscópico del espaciotiempo y la gravedad, en tanto que la segunda es una teoría de la materia y la radiación en el dominio atómico y subatómico. Aunque el rango de fenómenos contemplados por la mecánica cuántica es inmensamente mayor que el abarcado por la teoría general de la relatividad, no alcanza todavía la coherencia interna necesaria para reputarla una teoría completa. Debería incluir la teoría de Einstein como caso límite para masas y distancias grandes.

Todavía en 1928, cuando Paul Dirac propuso la ecuación sobre el electrón, que supuso un cambio de inflexión en la mecánica cuántica, recién sistematizada por Werner Heisenberg y Erwin Schrödinger, las únicas partículas conocidas eran electrones, protones y fotones. Apuntalada la descripción del fotón en el marco de las ecuaciones de Maxwell, el formalismo de Dirac permitía ahora extender lo propio al protón y al electrón. Con la idea de aforo recibía, además, un fundamento la interacción electromagnética, vehiculada por el fotón. Se contaba, pues, con las herramientas básicas para la descripción de todas las partículas conocidas de la naturaleza, junto con sus interacciones más manifiestas.

Pero si los protones y electrones de Dirac, que sólo interaccionaban electromagnéticamente, constituyeran los únicos componentes de los átomos, entonces todos los núcleos (salvo el protón solitario del núcleo de hidrógeno) se desintegrarían instantáneamente, en virtud de la repulsión electrostática del predominio de cargas positivas. Algo más tenía que haber en el núcleo que ejerciera una influencia determinante. En 1932, James Chadwick descubrió el neutrón. El modelo protón/electrón, vigente hasta entonces, se sustituyó por un modelo de protones y neutrones, donde una interacción protón-neutrón mantenía unido el núcleo (la fuerza

fuerte). En otro orden, la radiactividad del uranio, conocida desde las observaciones de Henri Becquerel en 1896, demostró ser resultado de la fuerza débil, distinta de la fuerte y de la electromagnética.

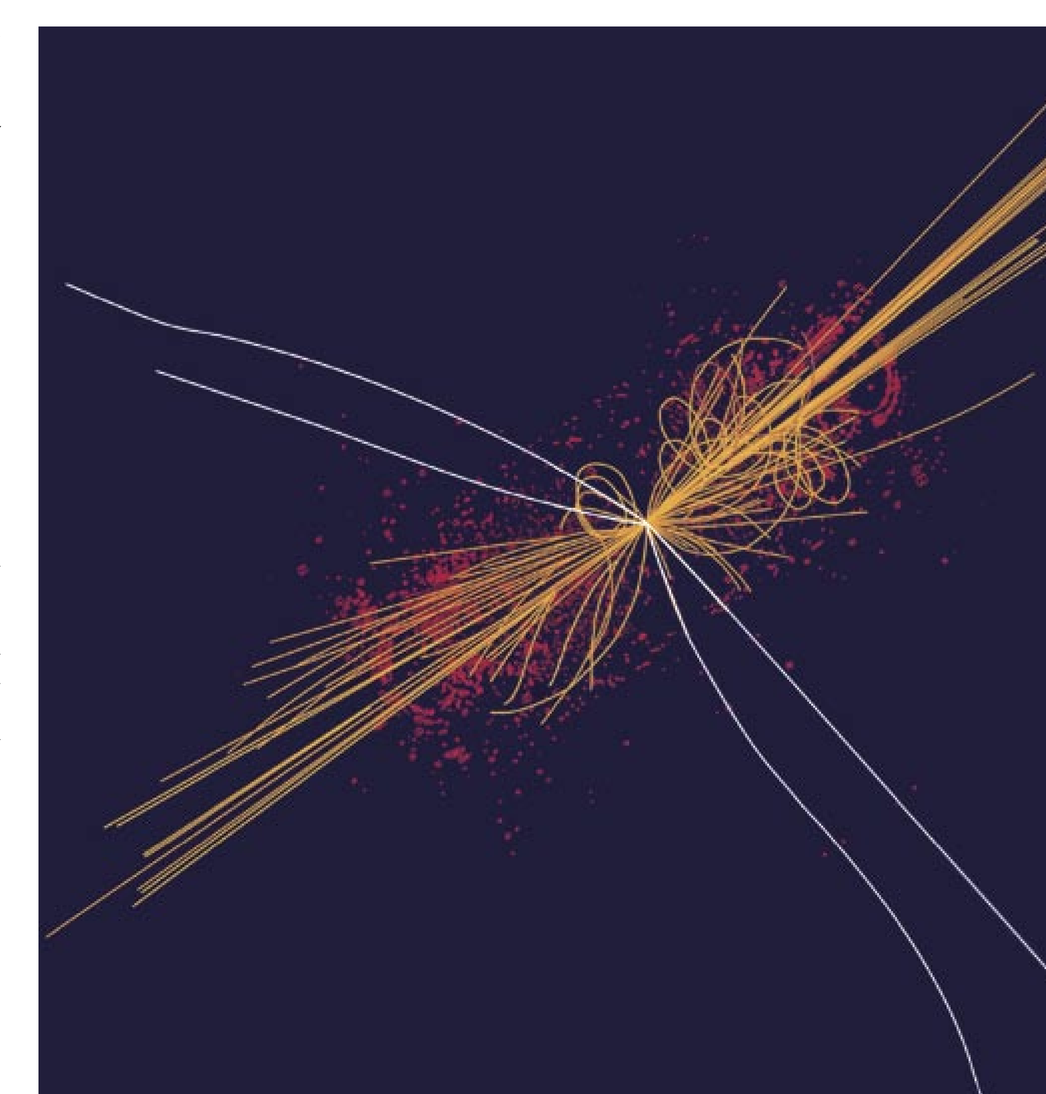
De acuerdo con el modelo estándar, los nucleones se hallan, a su vez, constituidos por quarks. El protón consta de tres quarks: dos quarks arriba y un quark abajo, cada uno de un color distinto. El neutrón se compone de un quark arriba y dos quarks abajo, con sendos colores diferentes. En efecto, hay quarks arriba ("up", *u*) y quarks abajo ("down", *d*); cada uno de ellos se presenta en una triple variedad de color: rojo, verde y azul (una denominación arbitraria sin nada que ver con el color real). Existe, por tanto, un quark arriba rojo, un quark arriba verde y un quark arriba azul. Dígase lo propio del quark abajo.

Con los diagramas de Feynman las partículas comenzaron a representarse por líneas y, las interacciones, por puntos (vértices), donde esas líneas se juntan. A cada diagrama podemos agregar una especificación precisa del estado inicial y final del sistema. Los estados iniciales suelen ser partículas que proceden de los aceleradores; los estados finales, partículas registradas en los detectores. Para conocer la posible estructura de los quarks se provocan colisiones entre protones y antiprotones con una energía de 1,96 teraelectronvolt en el acelerador de partículas más potente del mundo, el Tevatrón. De momento, los quarks se consideran puntiformes, privados de estructura interna, lo mismo que el electrón.

¿Por qué los físicos de partículas necesitan acelerar las partículas hasta altas energías? En algunos casos, la energía puede facilitar la materialización de nuevas partículas, de acuerdo con la famosa equivalencia de Einstein entre masa y energía: $E = mc^2$. Un ejemplo extremo es cuando la materia y la antimateria se aniquilan mutuamente en energía pura, que puede rematerializarse de nuevo en diferentes partículas. De ese modo, los físicos de partículas están capacitados para crear partículas y formas de materia que no ocurren en la Tierra en condiciones naturales, pero que bien pueden darse en rincones más violentos del universo.

Crear las condiciones extremas, más calientes que las de cualquier estrella, próximas a las del universo primitivo, constituye sólo parte del reto. No serviría de nada si no pudiéramos ver qué sucede y registrar los resultados. Las partículas creadas en las actuales colisiones de altas energías pueden tener un diámetro inferior a 10^{-16} cm, más pequeñas con respecto a un grano de arena que un grano de arena respecto a la distancia que nos separa del Sol. Y no sólo son pequeñísimas esas partículas, sino que además viven sólo una cienmillonésima de segundo o menos. Corresponde a los detectores registrar esas piezas efímeras de materia. Los detectores modernos son ingenios híbridos constituidos por numerosos subdetectores —contadores de centelleo, cámaras de deriva, contadores de Cerenkov, tiras de silicio— cuya tarea consiste en medir las trayectorias, los ángulos, las curvaturas, las velocidades y las energías de las partículas creadas en las colisiones.

Se ignora el origen de la masa de las partículas, velo que se espera rasgar con la observación del bosón de Higgs, si no en el Tevatrón, en el LHC (gran colisionador de hadrones) del CERN, que tomará de aquí a pocos años su relevo. A propósito de la masa, el modelo estándar establece una simetría entre materia y antimateria que no se manifiesta en nuestro universo, dominado por materia. A cada partícula le corresponde una antipartícula, que posee la misma masa y cuyas demás propiedades se definen exactamente con respecto a las propiedades de la partícula. Por ejemplo, la carga eléctrica tiene signo opuesto. Se admite el caso especial en que la antipartícula correspondiente a una partícula sea la propia partícula, lo que exige que la carga de la partícula sea necesariamente cero. El fotón es esa partícula; constituye su propia antipartícula. La operación que sustituye cada partícu-



1. Así podría ser el bosón de Higgs, partícula decisiva para comprender el origen de la masa.

la por su antipartícula se denomina C (de conjugación de carga). Una interacción física que sea invariante bajo la sustitución de partículas por sus antipartículas (y a la inversa) será invariante en C. La operación de reflexión espacial se conoce por P (de paridad). Las interacciones débiles no son invariantes ni en P ni en C por separado, pero sí lo son en la operación combinada PC.

Del ostracismo en que parecía haber quedado la teoría general de la relatividad la sacó John Archibald Wheeler, discípulo de Bohr, en su afán por tender puentes para allanar la incompatibilidad aparente entre aquélla y la mecánica cuántica, con su extensión a la teoría cuántica de campos. Propuso que, llegados a cierto nivel, los efectos cuánticos repercutirían de una forma significativa en la física de la gravitación. Y puesto que la teoría de Einstein anuda física gravitatoria con geometría, el resultado neto debería ser una suerte de dinámica cuántica del espaciotiempo. En ella, la geometría del espaciotiempo se halla sometida a reglas cuánticas, incluido el principio de incertidumbre de Heisenberg. Gracias a Wheeler, la gravitación tornó al curso central de la investigación física, lo que condujo al explosivo desarrollo de la astrofísica y la cosmología de nuestros días. A este respecto, suyas son las expresiones de "agujero negro", agujero de gusano, espuma de espaciotiempo y otras de semejante tenor.

Aunque el concepto de agujero negro se encontraba implícito en la teoría general de la relatividad, no se reparó en sus extraordinarias propiedades físicas hasta la segunda mitad de los años sesenta, a raíz de los trabajos de Wheeler, Roger Penrose, Stephen Hawking, Robert Geroch, Brandon Carter y otros. Desde el comienzo se advirtió que una ley básica de la física —la segunda ley de la termodinámica— quedaba en entredicho con la existencia de tales objetos, pues menguaban la entropía del universo. A la inversa, si un agujero negro era perfectamente negro, su propia entropía parecería ser infinita. Wheeler pensó que la mecánica cuántica aportaría una forma de obviar esa aporía y salvar la segunda ley de la termodinámica. Con su discípulo Jacob Bekenstein barruntó que el área del horizonte de sucesos del agujero negro constituía una forma nueva de entropía, de suerte que, cuando un agujero negro absorba calor, aumentará de tamaño, y su entropía crecerá en la proporción al menos de la pérdida de entropía térmica.

En septiembre de 1939, el mismo día en que empezó la segunda guerra mundial, apareció en la revista *Physical Review* un artículo que llevaba por título "The mechanism of nuclear fission", escrito por Bohr y Wheeler. Se trata de una pieza maestra sobre el núcleo de uranio 236. Se forma cuando un neutrón es capturado por un núcleo de uranio 235. El núcleo de uranio bascula en la frontera entre la física clásica y la física cuántica. Visto desde un punto de vista clásico, constituye una gota de un fluido dotado de carga positiva. La fuerza electrostática que tiende a partirlo queda equilibrada por la tensión superficial nuclear que lo mantiene en su integridad. La energía aportada por el neutrón capturado provoca la oscilación de la gota en diversos modos normales que pueden calcularse clásicamente. Considerado desde una óptica cuántica, el núcleo constituye una superposición de diversos estados cuánticos, que conducen a

Heliosismología

SUNQUAKES, PROBING THE INTERIOR OF THE SUN, por Jack B. Zirker. Johns Hopkins University Press; Baltimore, 2003.

Cuando recibí el encargo de escribir una reseña sobre este libro lo tomé con mucha precaución. Es un tema que conozco lo suficiente como para saber que su divulgación entraña gran dificultad. Por otro lado, es el segundo sobre física solar escrito por el autor, cuyo primer libro encontré muy interesante.

El libro trata de heliosismología; es decir, se ocupa de las técnicas de sismología aplicadas al Sol que permiten, con observaciones muy precisas de las deformaciones de su superficie debido a las ondas acústicas (al igual que sucede con la Tierra), obtener información sobre su estructura interna. Este tipo de técnicas ha extendido su empleo a la ingeniería y otras disciplinas. En medicina, por ejemplo, la ecografía ha significado un extraordinario avance de diagnóstico no invasivo del estado del interior del cuerpo humano. Mas, a diferencia del cuerpo humano, de un puente y de la Tierra, con el Sol no es posible generar, ni, por tanto, controlar, las ondas acústicas que después de viajar por el interior del objeto de estudio vuelven a la superficie y son detectadas, estudiadas y los resultados interpretados en términos de la estructura de las capas que han ido atravesando.

A lo largo de los treinta años de aplicación solar hemos asistido a los rápidos progresos de las técnicas en cuestión: desde los experimentos pioneros desarrollados en diferentes observatorios hasta el lanzamiento de los experimentos GOLF, VIRGO y MDI en la misión espacial conjunta ESA-NASA, pasando por el establecimiento de redes heliosísmicas mundiales que requieren la colaboración internacional. Ello ha supuesto un avance sustancial de nuestro conocimiento sobre la estructura interna del Sol, la estrella originaria del sistema planetario solar y de la vida. El libro constituye una crónica de lo acontecido en estos años.

El autor explica qué, quién, dónde y cómo se han ido desarrollando los experimentos, los hitos y la sistematización del cuerpo doctrinal de la disciplina. Se advierte, no obstante, cierta falta de documentación para escoger los hitos más relevantes; con otras palabras, presenta un claro sesgo pro-estadounidense, amén de caer en algunos errores de importancia. Para su comprensión, además, requiere una formación cercana a la especialización; el lenguaje y las técnicas matemáticas requeridas para la interpretación de los resultados que se presentan en el libro están muy poco desarrollados. El libro abunda en resultados experimentales, gráficos e imágenes, que no siempre logran aclarar los avances que se relatan.

—TEODORO ROCA CORTÉS

2. Arbol de electrones en un fragmento de plástico.

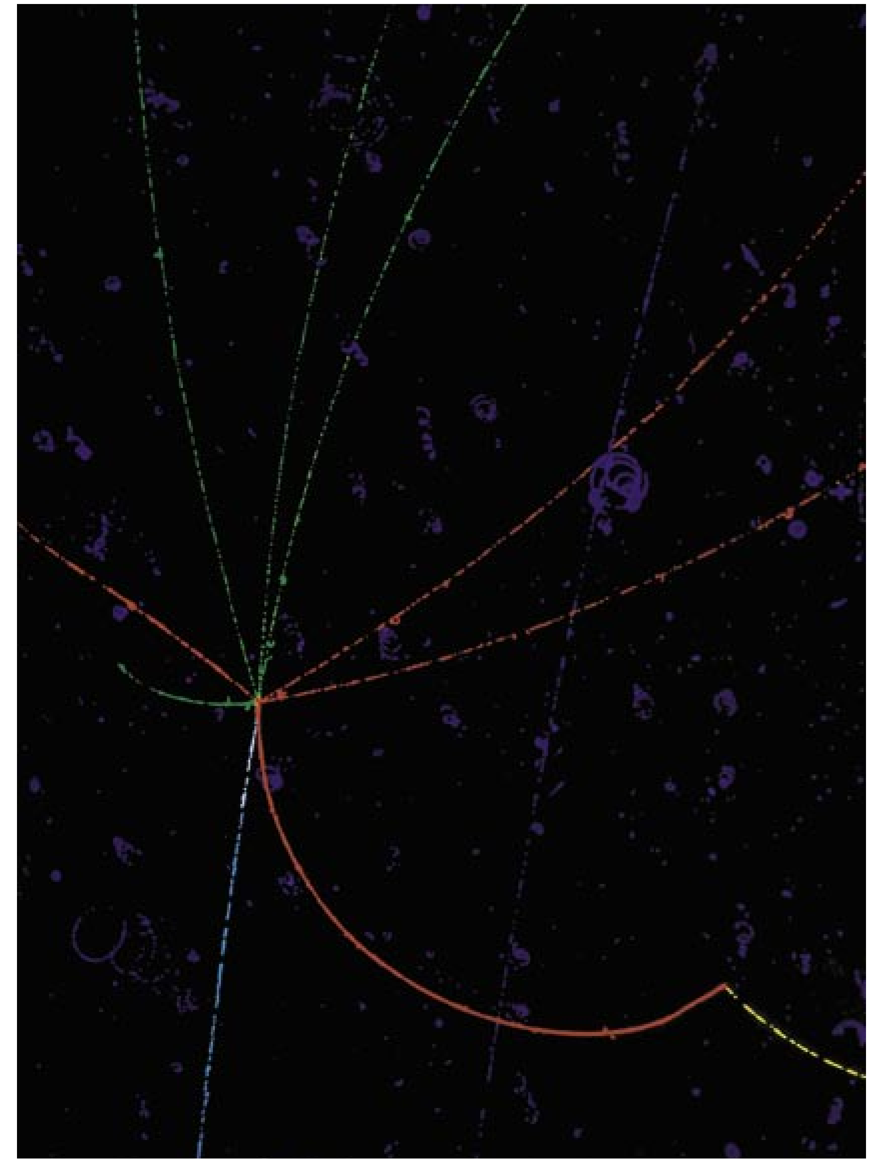


resultados finales dispares. Un resultado final puede ser un núcleo de uranio 235 con la reemisión de un neutrón; otro puede ser un núcleo de uranio 236 con emisión de rayos gamma, o puede ser también núcleos de fragmentación de emisión con uno o más neutrones libres. En un prodigio de demostración de la potencia de la mecánica clásica y de la mecánica cuántica cuando operan conjuntas, Bohr y Wheeler calcularon la sección eficaz de la fisión de uranio 235 para un neutrón lento. Al ahondar en los pormenores de ese proceso, demostraron que las tesis de la complementariedad aportadas por las descripciones cuánticas y clásicas resultaban esenciales para la comprensión de la naturaleza.

Wheeler llevó la teoría de la información a los fundamentos de la física en su famoso dictum “it from bit”, donde “it” remite a un objeto (por ejemplo, un átomo) y “bit” constituye la información con él relacionada. Para un teórico, un bit es una abstracción: una cantidad de información; para un programador, un bit es una variable booleana; para un ingeniero, es un biestable, una pieza de hardware. ¿Para un físico? Wheeler lo relaciona con la epistemología de la mecánica cuántica, con el dilema clásico de si la función de onda de Schrödinger describe una realidad física (“it”) o una clase de información (“bit”). Para muchos físicos actuales, en efecto, la mecánica cuántica no aporta un cuadro de la realidad, sino que, en su entraña, debe considerarse un formalismo puramente matemático. Tal formalismo no nos diría nada sobre una realidad cuántica existente del mundo, sino que sólo nos permitiría calcular probabilidades para realidades alternativas que pudieran ocurrir. En cambio, para otros, el vector de estado sí representa la realidad, aunque niegan que se produzca una reducción del estado cuántico cuando se realiza una medición.

En la aplicación de la mecánica cuántica al universo, quizás una extrapolación sin par en la historia de la ciencia, Wheeler desempeñó un papel decisivo. Estableció una analogía entre la inestabilidad del átomo clásico, resultando en la emisión de una cantidad infinita de radiación, y la curvatura infinita espaciotemporal del colapso gravitatorio. Conjeturó que, así como la mecánica cuántica había salvado a la mecánica clásica de la divergencia de las magnitudes y predecía un átomo finito y estable, del mismo modo la mecánica cuántica mejoraba la singularidad de la gran explosión. Pero, ¿podía tomarse en serio la aplicación de la mecánica cuántica, una teoría del dominio subatómico, a la cosmología, el mayor sistema que existe? Wheeler creyó en ello y con Bryce De Witt produjo una suerte de ecuación de Schrödinger para el cosmos. Así nació la cosmología cuántica, una nueva disciplina.

Hoy la mayoría de los cosmólogos están de acuerdo en que el universo se originó en un proceso cuántico. La



3. Un antiprotón (*azul pálido*) golpea contra un protón en un cámara de burbujas.

idea recibió un empujón a comienzos de los ochenta con la doctrina del universo inflacionario de Alan Guth. Algunos cosmólogos sugirieron que las fluctuaciones cuánticas de la era inflacionaria crearon las irregularidades del universo primitivo que servían de semillas para una estructura de macroescala. Si estuvieran en lo cierto, las ligeras variaciones de temperatura detectadas en la radiación térmica del fondo de microondas serían sólo fluctuaciones cuánticas. Andrei Linde desarrolló su propia variante de la teoría inflacionaria, a la que denominó inflación caótica. Una de sus principales predicciones establece que "el universo" bien pudiera ser una "burbuja de Hubble" dentro de un multiverso de vastas proporciones.

La teoría del multiverso sugiere que nuestra burbuja pudiera constituir un raro oasis de habitabilidad en un desierto hostil a la vida. En cuyo caso, muchas de las propiedades felices que observamos, incluido el hecho de que la física de "nuestro universo" posibilite la vida, deriven de una suerte de selección cósmica. Esta teoría se insiere en el marco general del principio antrópico. ¿Por qué goza nuestra región de esas condiciones privilegiadas para la vida? No sería descabellado pensar que determinadas propiedades de nuestro mundo no fueran realmente fundamentales, sino resultado de accidentes congelados; por ejemplo, la intensidad relativa de las fuerzas de la naturaleza. De un modo más radical hay quienes rechazan que existan realmente leyes fundamentales de la física genuinamente fijas. Harto divulgada está la polémica en torno a la cuestión de la posibilidad de que hubiera leyes diferentes.

La teoría de cuerdas, por fin, espera reconciliar la teoría de la gravedad de Einstein con las reglas de la mecánica cuántica, responder a las cuestiones centrales de física de partículas e incluso explicar por qué apareció el universo. En el contexto de la teoría, las partículas son finas cuerdas vibratorias y el universo consta de 10 dimensiones. Aunque sólo nos es dado percibir las cuatro familiares (tres espaciales y el tiempo). Muchos físicos, además, se esfuerzan en reconciliar la teoría de cuerdas con el modelo estándar.

A la teoría de cuerdas se recurre para explicar la expansión acelerada del universo, descubierta en 1998 en el transcurso de un rastreo de supernovas, explosiones estelares remotas. Las observaciones sugerían que algo producía el estiramiento del espaciotiempo. Y eso era precisamente lo que Einstein imaginó 80 años antes cuando pensó en una energía ampliadora del espacio, la constante cosmológica. Aunque Einstein renegó luego de su "error", la constante cosmológica aparece ahora con toda su fuerza y los teóricos de cuerdas esperan calcular su valor. Las observaciones de los últimos años parecen favorecer un valor positivo.

A lomos de la teoría de cuerdas, se está imponiendo la idea de que nos hallamos en las puertas de una teoría del todo. Para algunos, así Penrose, nos encontramos muy lejos de una teoría final. Es cierto que determinados avances matemáticos han procedido de la teoría de cuerdas. Pero no son más que piezas de matemática, aunque con cierta dosis de ideas físicas. La teoría de cuerdas es una teoría de la gravedad cuántica. Hallar una teoría de gravedad cuántica no es sólo una cuestión de coherencia matemática; existen procesos físicos que no podemos describir con las teorías disponibles. El más notable de éstos es el comienzo del universo, los momentos iniciales de la gran explosión.

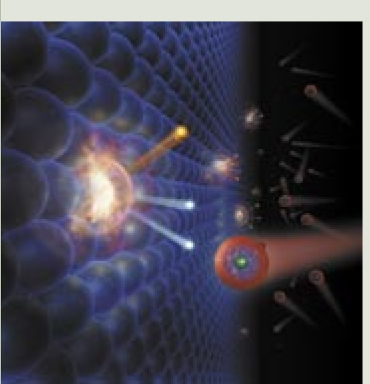
—Luis Alonso





MUERTE APARENTE PREVENTIVA, por Mark B. Roth y Todd Nystul

Poner el cuerpo humano en "modo de espera" protegería a los individuos gravemente heridos y mantendría la integridad de los órganos que, extraídos del donante, no se han trasplantado todavía.



CREACION DE ANTIMATERIA FRIA, por Graham P. Collins

Atomos poco energéticos de antihidrógeno permitirán someter a prueba una propiedad fundamental del universo.



LA APARICION DE LA MENTE MODERNA, por Kate Wong

Ciertos hallazgos polémicos señalan que las raíces de nuestra tan alardeada inteligencia son mucho más profundas en el tiempo de lo que se pensaba.

CONSTANTES INCONSTANTES, por John D. Barrow y John K. Webb

¿Cambia con el tiempo el funcionamiento interno de la naturaleza?

ESPECIACION CROMOSOMICA EN PRIMATES, por Arcadi Navarro

El desarrollo de un nuevo modelo de cómo se forman las especies a partir de grandes cambios cromosómicos arroja luz sobre la separación de humanos y chimpancés.

